



ESCOLA NAVAL

ta tante de bi-faire



Ricardo Jorge Moreira Barbarroxa de Araújo Pires

Projeto SABUVIS II – Desenvolvimento do Projeto e Construção de um Protótipo de Veículo Não Tripulado de Subsuperfície

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na especialidade de
Engenharia Naval ramo de Mecânica



Alfeite

2021



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Ricardo Jorge Moreira Barbarroxa de Araújo Pires

**Projeto SABUVIS II – Desenvolvimento do Projeto e Construção de um Protótipo de Veículo
Não Tripulado de Subsuperfície**

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na especialidade de
Engenharia Naval ramo de Mecânica**

Orientação de: Capitão de fragata EN-MEC ACN Paulo Alexandre Marques Pires da Silva

Coorientação de: Professor Bruno Duarte Damas

O Aluno Mestrando

O Orientador

Ricardo Jorge M. Barbarroxa A. Pires

Ricardo Jorge Moreira Barbarroxa de Araújo Pires

Paulo Alexandre Marques Pires da Silva

ASPOF EN-MEC

CFR EN-MEC

Alfeite

2021

“For the great doesn’t happen through impulse alone and is a succession of
little things that are brought together.”

Vincent Van Gogh

Dedicada à minha família e à minha namorada fontes do meu sucesso e motivação.

Agradecimentos

O desenvolvimento desta dissertação é o culminar de cinco anos de trabalho, esforço e dedicação que contaram com o apoio e participação de diversas pessoas sem as quais não teria sido possível.

À minha mãe responsável pela pessoa que sou hoje, por me inculcar os valores de responsabilidade, respeito e dedicação, essenciais na formação de um oficial da Marinha, e pelo seu apoio e compreensão incondicionais.

À minha família que sempre me motivou e apoiou nos momentos de maiores dúvidas.

À minha namorada que aturou as más disposições e frustrações de um dia mau, que me apoiou, demonstrou o seu carinho e me deu força para enfrentar as adversidades.

Ao meu orientador, CFR EN-MEC Pires da Silva, pela disponibilidade demonstrada independentemente das horas para a resolução de problemas bem como a sua motivação e apoio.

Ao meu coorientador, professor Bruno Damas, pela pré-disposição a ajudar na área da eletrónica e pelas diretrizes fornecidas para a elaboração da presente dissertação.

À equipa da oficina da Escola Naval pela disponibilização de meios e de pessoal para a execução de certos trabalhos.

Aos membros da minha camarata, Paulo, Joel e Marcos, por todo o apoio, pelas horas de convívio, pela camaradagem e amizade desenvolvidas ao longo destes anos.

À Escola Naval, pela formação ministrada ao longo destes cinco anos fundamental para formação de um oficial da Marinha e para a elaboração desta dissertação.

Resumo

O crescimento que se tem evidenciado, ao longo dos últimos anos, de estudos dedicados a veículos biomiméticos demonstram as suas vantagens e potencialidades- A sua crescente produção nas mais variadas formas revela-nos uma janela para o futuro. Com o intuito de acompanhar esta evolução, e na sequência da participação da Escola Naval no projeto SABUVIS I na construção de um veículo deste género, BUV3, iniciou-se o projeto e construção do TOBIAS inserido no projeto SABUVIS II. O projeto SABUVIS II tem como objetivo global a criação de um cardume constituído por unidades executantes e unidades controladoras.

A presente dissertação inicia-se um ano após o início do projeto e construção de uma unidade executante, numa altura em que a forma, sistema de propulsão e componentes eletrónicos estão bem definidos.

Este trabalho tem como objetivo principal o aprontamento deste veículo para a realização de testes de estanqueidade. Para isto será necessário rever todo o trabalho realizado até ao momento, no sentido de aperfeiçoamento de componentes existentes, como por exemplo as barbatanas peitorais, bem como a construção de componentes em falta. Por fim serão montados todos os componentes exteriores deixando o veículo pronto a executar testes.

Palavras-Chave: Veículo Autónomo de Subsuperfície; Veículo Autónomo Biomimético; Estanqueidade; Barbatanas Peitorais; Aspetos de Produção e Construção.

Abstract

The growth that has been evident over the last few years of studies dedicated to biomimetic vehicles demonstrate their advantages and potentialities, as well as their growing production in the most varied forms, revealing a glimpse to the future. In order to keep up with this evolution, Escola Naval participated in the SABUVIS I project through the construction of a vehicle of this kind, BUV3. This project was followed by the design and construction of TOBIAS as part of the SABUVIS II project. The SABUVIS II project has the overall objective of developing a shoal of biomimetic vehicles, consisting of executing units and controlling units.

This dissertation is developed one year after the beginning of the project for design and construction of an executing unit, at a time when its shape, propulsion system and electronic components are well defined.

This work has as main objective the readiness of this vehicle for trials of watertightness tests. For this purpose, it will be necessary to review all the work carried out so far, in order to improve existing components and build missing components. Finally, all external components will be assembled, leaving the vehicle ready to perform the trials.

Key words: Autonomous Subsurface Vehicle; Autonomous Biomimetic Vehicle; Tightness; Pectoral fins; Production and Construction Aspects.

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	2
1.2. <i>SWARM OF BIOMIMETIC UNDERWATER VEHICLE (SABUVIS)</i>	3
1.2.1. <i>SABUVIS I</i>	3
1.2.2. <i>SABUVIS II</i>	5
1.3. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	6
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	7
2. ESTADO DA ARTE	9
2.1. INTRODUÇÃO AOS UUV	9
2.1.1. <i>ROV</i>	10
2.1.2. <i>AUV</i>	11
2.2. PLANADORES SUBAQUÁTICOS	13
2.2.1. <i>O que são?</i>	13
2.2.2. <i>Funcionamento</i>	15
2.2.3. <i>Exemplos de planadores</i>	16
2.3. <i>“PROPELLED” AUV’S</i>	18
2.3.1. <i>O que são?</i>	18
2.3.2. <i>Funcionamento?</i>	19
2.3.3. <i>Exemplos</i>	19
2.3.3.1. <i>Tethys</i>	19
2.3.3.2. <i>Gavia AUV</i>	21
2.4. <i>BUV</i>	22
2.4.1. <i>O que são?</i>	22
2.4.2. <i>Funcionamento?</i>	23
2.4.3. <i>Exemplos</i>	25
2.4.3.1. <i>RoboTuna (Charlie I)</i>	25
2.4.3.2. <i>RobotPike</i>	27
2.4.3.3. <i>BR3</i>	27
2.4.3.4. <i>RoboSalmon v2.0</i>	28
2.5. PROJETO DE VEÍCULOS BIOMIMÉTICOS	29
2.6. <i>“TOBIAS”</i>	31
3. PROJETO E ESTUDO DAS BARBATANAS PEITORAIS	37

3.1.	PERFIL DA BARBATANA	38
3.2.	BUCIM DO VEIO	43
3.3.	VEIO	45
4.	ASPETOS DE PRODUÇÃO E CONSTRUÇÃO	55
4.1.	BARBATANA CAUDAL.....	55
4.2.	VEIOS DAS BARBATANAS PEITORAIS.....	59
4.3.	COBERTURA FRONTAL	60
4.4.	BASE DOS SENSORES	62
5.	TESTES	65
5.1.	TESTES AOS VEIOS	65
5.2.	TESTES ESTANQUEIDADE.....	66
5.2.1.	<i>Cobertura Frontal</i>	<i>66</i>
5.2.2.	<i>Barbatana Dorsal</i>	<i>67</i>
5.2.3.	<i>Veio da Barbatana Peitoral</i>	<i>67</i>
5.2.4.	<i>Geral</i>	<i>68</i>
5.3.	TESTE AO SISTEMA DE PROPULSÃO.....	71
6.	LIÇÕES APRENDIDAS E TRABALHO FUTURO	73
6.1.	LIÇÕES APRENDIDAS	73
6.2.	TRABALHO FUTURO.....	75
	CONCLUSÃO	77
	BIBLIOGRAFIA.....	78
	APÊNDICE A - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NO SOLIDWORKS PARA O VEIO.....	84
	APÊNDICE B - VEIO – DESENHO TÉCNICO.....	89
	APÊNDICE C - BUCIM DO VEIO DA BARBATANA PEITORAL – DESENHO TÉCNICO.....	91
	APÊNDICE D - BARBATANA PEITORAL – DESENHO TÉCNICO	93
	APÊNDICE E - RETENTOR DA BARBATANA DORSAL – DESENHO TÉCNICO.....	95
	APÊNDICE F - COSTELA ANTERIOR – DESENHO TÉCNICO	97
	APÊNDICE G - COSTELA POSTERIOR – DESENHO TÉCNICO	99
	APÊNDICE H - MOLDE INTERIOR – DESENHO TÉCNICO	101
	APÊNDICE I - MOLDE EXTERIOR – DESENHO TÉCNICO	103
	APÊNDICE J - LIGAÇÃO CONECTOR- CAUDA – DESENHO TÉCNICO	105

APÊNDICE K	- CONECTOR CAUDA-BARBATANA – DESENHO TÉCNICO	107
APÊNDICE L	- CAUDA – DESENHO TÉCNICO	109
APÊNDICE M	– VISTA EXPLODIDA.....	111
APÊNDICE N	- CÓDIGO PARA GERAR MOVIMENTO NOS SERVOS	113
ANEXO I	- CARACTERÍSTICAS E PONTOS FORTES DA LOCOMOÇÃO BCF	115
ANEXO II	- CARACTERÍSTICAS E PONTOS FORTES DA LOCOMOÇÃO MPF	117
ANEXO III	- GRÁFICOS DOS COEFICIENTES DE ARRASTO E SUSTENTAÇÃO EM RELAÇÃO AO ÂNGULO DE ATAQUE.....	119

Lista de Figuras

Figura 1.1 - BUV 1, protótipo desenvolvido pela Universidade de Tecnologia da Cracóvia.	4
Figura 1.2 - BUV 2, protótipo desenvolvido pela Academia Naval Polaca.	5
Figura 1.3 - BUV 3, protótipo desenvolvido pelo CINAU, Escola Naval, FEUP e Oceanscan.....	5
Figura 2.1 Síntese dos vários tipos de UUV	9
Figura 2.2 - Exemplo de um ROV	10
Figura 2.3 Constituição geral de um AUV	12
Figura 2.4 - Diagrama do planador Slocum G3.....	14
Figura 2.5 - Percurso de um planador enquanto recolhe dados.....	15
Figura 2.6 - Planador que utiliza um sistema de óleo.	16
Figura 2.7 - Planador Slocum G3.....	17
Figura 2.8 - Planador Seaglider	18
Figura 2.9 - LRAUV Tethys desenvolvido pela MBARI's.....	20
Figura 2.10 – Gavia AUV desenvolvido pela Teledyne Marine.....	21
Figura 2.11 - Anatomia externa de um peixe cartilagíneo	22
Figura 2.12 - Classificação dos diferentes tipos de locomoção dos BUVs.....	23
Figura 2.13 - Diagrama síntese com relação entre tipos de propulsão, movimento e as funções para as quais são utilizados.	25
Figura 2.14 – Estrutura interna do RoboTuna.	26
Figura 2.15 - RobotTuna no tanque de testes do MIT.....	26
Figura 2.16 - Pike Fish num tanque com um dos seus investigadores, John Kumph.	27
Figura 2.17 - BR3 a executar testes num túnel de vento.	28
Figura 2.18 – <i>RoboSalmon v2.0 com cauda</i>	29
Figura 2.19 - Fases do projeto e construção de um BUV	30
Figura 2.20 - Primeira versão do TOBIAS	31

Figura 2.21 - a) Cilindro Central; b) Base dos Sensores do Cilindro Central; c) Peça do Cilindro Central; d) Disco Estrutural AV; e) Disco Estrutural AR; f) Barbatana Dorsal; g) Cobertura Frontal.	32
Figura 2.22 – a) Peça de acoplamento Seringa/estrutura; b) Fim-de-curso; c) Estruturas de Suporte dos Tanques de Flutuabilidade; d) Sistema de flutuabilidade...	32
Figura 2.23 - a) Bucim do veio; b) Veio da barbatana. peitoral.....	33
Figura 2.24 – Placa anterior e posterior; b) Costelas em PLA; c) Conectores dos servos em PLA; e) Instalação propulsora completa; f) Instalação Propulsora montada.	33
Figura 2.25 - Imagem final do protótipo.....	34
Figura 2.26 - Estado do veículo no início da presente dissertação	36
Figura 3.1 - Movimento das barbatanas peitorais: a) Remada (<i>Rowing</i>); b) Rotação (<i>Feathering</i>); c) Batimento (<i>Flapping</i>).	38
Figura 3.2 - Nomenclatura de um perfil alar.	39
Figura 3.3 - Aplicação das forças de arrasto e sustentação	40
Figura 3.4 - Explicação e exemplo:	41
Figura 3.5 – Barbatana Peitoral v1 a) Plano Superior; b) Vista Lateral; c) Vista geral.	42
Figura 3.6 - Barbatana Peitoral v2	42
Figura 3.7 - Bucim v1	43
Figura 3.8 - Bucim do veio v2.....	44
Figura 3.9 – Bucim do veio v3.....	44
Figura 3.10 - Servo JX BLS-12V7146 e acessórios	45
Figura 3.11 - Veio v1	46
Figura 3.12 – Alternativas ao veio original. a) Ligação em estrela de quatro pontas; b) Veio em cruz; c) Veio reto.	50
Figura 3.13 – Tensão de VonMises ao longo do veio quando aplicadas as forças de arrasto e sustentação.	52
Figura 3.14 – Tensão de corte quando aplicadas as forças de arrasto e sustentação.....	53

Figura 4.1 - Suporte da cauda. a) Parte interior; b) Parte onde se irá ligar a barbatana caudal.....	56
Figura 4.2 - Conector da placa à barbatana caudal.	56
Figura 4.3 – Molde Interior (Esquerda) e Molde Exterior (Direita).	57
Figura 4.4 – Construção do molde exterior utilizando argila	58
Figura 4.5 – Moldes exterior e interior impressos em PLA.	58
Figura 4.6 – Várias etapas no processo de produção da cobertura.	59
Figura 4.7 – Primeiro veio construído.	59
Figura 4.8 – Algumas das tentativas até obter um veio com resultados positivos ao teste de estanqueidade.	60
Figura 4.9 – Exemplo de um domo em acrílico.	61
Figura 4.10 – Parte frontal montada e estanque.	61
Figura 4.11 A imagem à esquerda corresponde à peça que se pretendia adquirir. A imagem da direita corresponde à peça adquirida.	62
Figura 4.12 – Base dos sensores com sensores e tubos.....	63
Figura 5.1 – Montagem de todo o sistema.....	65
Figura 5.2 Metodologia e resultados obtidos. a) Material utilizado; b) Teste em curso; c) Teste falhado.	66
Figura 5.3 – Teste de estanqueidade realizado à barbatana dorsal.....	67
Figura 5.4 - Teste realizado aos veios. a) Bucim alterado e veio; b) O veio é inserido no bucim que é posteriormente cheio de água; c) Exemplo de um teste falhado; d) Exemplo de um teste bem-sucedido.....	68
Figura 5.5 – Veículo montado para efetuar o teste de estanqueidade	69
Figura 5.6 – Teste de estanqueidade geral. a) Colocação do veículo na água; b) Veículo a pairar apenas com apoio para não rodar; c) Veículo submerso através de forças externas; d) Veículo a pairar sem apoio.	69
Figura 5.7 - Estrutura da cauda após o teste.....	71
Figura 5.8 – Teste efetuado ao sistema de propulsão.	72
Figura A.1 - Resultados da deformação em mm para o veio em aço AISI 304...	84

Figura A.2 - Resultados da tensão de VonMises em N/m^2 para o veio em aço AISI 304.....	84
Figura A.3 - Resultados da deformação em mm para o veio em alumínio 5083-H111.....	85
Figura A.4 - Resultados da tensão de VonMises em N/m^2 para o veio em alumínio 5083-H111.	85
Figura A.5 - Resultados da deformação em mm para o veio em PLA e força aplicada de 93.67N.	86
Figura A.6 - Resultados da tensão de VonMises em N/m^2 para o veio em PLA e força aplicada de 93.67N.....	86
Figura A.7 - Resultados da tensão de VonMises em N/m^2 para o veio em PLA e força aplicada de 78N.....	87
Figura A.8 - Resultados da deformação em mm para o veio em PLA e força aplicada de 78N.	87
Figura B.1 - Veio.....	89
Figura C.1 - Bucim do veio da Barbatana Peitoral	91
Figura D.1 - Barbatana Peitoral.....	93
Figura E.1 - Retentor da Barbatana Dorsal	95
Figura F.1 – Costela Anterior	97
Figura G.1 – Costela Posterior	99
Figura H.1 – Molde Interior para a construção da Barbatana Caudal em silicone.	101
Figura I.1 – Molde Exterior para a construção da Barbatana Caudal em silicone.	103
Figura J.1 – Ligação da placa conectora posterior ao conector da barbatana caudal.....	105
Figura K.1 – Conector entre a cauda e a barbatana caudal.....	107
Figura L.1 – Cauda.....	109
Figura M.1 – Vista explodida dos componentes externos do TOBIAS.	111
Figura N.1 – <i>Servo Sweep</i>	113

Lista de Tabelas

Tabela 1 – AUV's vs. ROV's: Vantagens e Desvantagens.	13
Tabela 2 - Características do Slocum G3.....	17
Tabela 3 - Lista de especificações do Seaglider.	18
Tabela 4 - Características do Tethys.	20
Tabela 5 - Especificações do Gavia AUV	21
Tabela 6 - Resumo do hardware e respetivos módulos em que se encontram.	35
Tabela 7 – Propriedades dos Materiais	47
Tabela 8 – Orçamento de menor valor obtido para a manufatura de um veio.	51

Lista de Abreviaturas, Acrónimos e Símbolos

Acrónimos

ABS – Acrilonitrilo Butadieno Estireno

AR – A Ré

ASA – Acrilonitrila Acrilato de Estireno

AUV – Autonomous Underwater Vehicle

AV – A Vante

BCF – Body and/or Caudal Fin

BUV – Biomimetic Underwater Vehicle

CAD – Computer Aided Design

CFD – Computational Fluids Dynamics

CNC – Computerized Numerical Control

EDA – European Defence Agency

EN – Escola Naval

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

IA – Inteligência Artificial

ISR – Intelligence, Surveillance and Reconnaissance

LAUV – Light Autonomous Underwater Vehicle

LRAUV – Long Range Autonomous Underwater Vehicle

LSTS – Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática

MBARI – Monterey Bay Aquarium Research Institute

MIT – Massachusetts Institute of Technology

MPF – Median and/or Paired Fin

NACA – National Advisory Committee for Aeronautics

NASA – National Aeronautics and Space Administration

PLA – Políácido Láctico

ROV – Remotely Operated Vehicle

SABUVIS – Swarm of Biomimetic Underwater Vehicles

SMA – Shape Memory Alloy

TOBIAS – Transformable and Optimizable Biomimetic Innovative Autonomous System

UUV – Unmanned Underwater Vehicle

Símbolos

μ_{mar} – Viscosidade dinâmica da água do mar [Pa/s]

A – Área da secção [m²]

D – Comprimento da corda [m]

P – Pressão [kPa]

Re – Número de Reynolds

Δ – Deslocamento do veículo [kg]

ρ – Massa específica do fluido [kg/m³]

v – Velocidade [m/s]

∇ – Volume imerso da carena [m³]

1. Introdução

“Simple animals adapt with impunity to the most challenging of conditions without training or supervision.”

(Prescott *et al.*, 2012)

O complexo mundo da robótica tem vindo a desenvolver-se a um ritmo cada vez maior e é cada vez mais, uma parte fundamental das nossas vidas. Os sistemas robóticos têm sido adaptados para realizar missões complexas em ambientes aquáticos (Blidberg, 2001; Colgate and Lynch, 2004; Habib and Paulo Davim, 2013; Raj and Thakur, 2016a; Salazar *et al.*, 2019). Atualmente, os veículos autónomos subaquáticos, em inglês, *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) mostram-se menos eficientes na área da propulsão, quando comparados aos BUV pela sua maneira de locomoção, sistema de propulsão tradicional (hélices) e pela sua forma geralmente rígida e cilíndrica (Blidberg, 2001; Salazar *et al.*, 2019).

Os veículos de subsuperfície biomiméticos, em inglês, *Biomimetic Underwater Vehicle* (BUV), têm um sistema de propulsão ondulante e são um novo ramo da área da robótica subaquática. Inspirados na morfologia dos seres que melhor se adaptaram aos mares e oceanos (ex.: peixes e mamíferos aquáticos), são projetados e desenvolvidos para realizar uma vasta gama de missões, que podem variar entre, a realização de levantamentos hidrográficos, monitorização de derrames de óleos, inspeção interna de tubos, observação de espécies animais, segurança de praia, espionagem, até missões vigilância e patrulha (Blidberg, 2001; Salazar *et al.*, 2019). Um veículo singular poderia ser considerado limitado ou inadequado para determinadas missões, contudo, este género de veículos têm a capacidade de serem integrados em cardumes, aumentando assim as suas áreas de atuação (Salazar *et al.*, 2019).

1.1. Motivação

Sendo os mares e oceanos locais valiosos, mas ao mesmo tempo perigosos tanto para quem navega na superfície, mas principalmente para quem navega abaixo da linha de água sujeito a altas pressões e num meio no qual, o ser humano, não consegue sobreviver naturalmente é da maior importância o desenvolvimento de veículos que permitam a exploração e navegação do meio subaquático sem risco para a sua tripulação.

Surge, assim, a necessidade de desenvolver veículos autónomos de subsuperfície não só por estes não colocarem vidas humanas em risco como pelo facto dos veículos não tripulados serem mais baratos de operar e manter do que veículos tripulados, a vigilância por parte destes veículos ser contínua e persistente e os recursos humanos que seriam destinados a esses veículos poderem ser utilizados noutras tarefas (Araújo, 2020). Visto que já existem AUV com alcances na ordem dos milhares de quilómetros (ex.: Seaglider, Tethys, Slocum G3, etc) e velocidades nas dezenas de nós chegou a altura de procurar o próximo passo na sua evolução, os BUV. Estes são uma evolução no sentido da manobrabilidade e eficiência em comparação aos AUV convencionais e aos *gliders*. Vários autores defendem que a eficiência da locomoção dos peixes é aproximadamente 90% enquanto um sistema de propulsão convencional de hélice é de 40%. Segundo Yu & Wang, “O sistema de propulsão de alguns peixes têm uma eficiência na ordem dos 90%, enquanto que um sistema de propulsão a hélice tem entre 40-50%” (Habib and Paulo Davim, 2013). De acordo com Man, “AUV’s com propulsão a hélice ou a jato têm uma eficiência de 40%, enquanto que, a locomoção utilizando uma barbatana oscilante tem uma eficiência entre 70-90% (Man *et al.*, 2012). “Comparado com a natação dos peixes, os métodos de propulsão criados pelo homem são bastante inferiores. Sabe-se que a eficiência de propulsão dos peixes excede os 90% (Du, Ruxu; Li, Zheng; Youcef-Toumi, Kamal; Valdivia y Alvarado, 2015).

Contudo este tipo de veículos ainda não se encontra disponível para aquisição no mercado como os veículos citados. É assim imperativo para a Escola Naval, desenvolver conhecimento nesta área projetando e construindo o seu próprio veículo. A presente

dissertação visa contribuir para a evolução desta tecnologia inovadora pela continuação do desenvolvimento do BUV da Escola Naval.

1.2. *Swarm of Biomimetic Underwater Vehicle (SABUVIS)*

O projeto SAVUBIS é um projeto de investigação internacional da *European Defence Agency* (EDA) e tem como objetivos principais o projeto e a construção de BUVs com propulsão silenciosa e ondulante para operações ISR.

Os objetivos do projeto são:

- Desenvolver tecnologia e *know-how* que permita a uma empresa portuguesa alargar a sua oferta de veículos submarinos para incluir veículos biomiméticos.
- Desenvolver técnicas de aprendizagem por reforço para controlar veículos autónomos submarinos.
- Desenvolver um simulador de UUV biomimético e ambiente de desenvolvimento para facilitar o desenvolvimento de técnicas de aprendizagem por reforço.
- Realizar testes e desenvolver conceitos de operação para veículos biomiméticos.
- Dotar as Forças Armadas de um protótipo de um UUV biomimético que possa ser usado operacionalmente.
- Identificar mais-valias operacionais deste tipo de sistemas e quais os desenvolvimentos futuros a perseguir.

O projeto encontra-se dividido em duas fases, SABUVIS I e SABUVIS II.

1.2.1. SABUVIS I

O SABUVIS I foi um projeto iniciado em 28/05/2015 e tinha como meta ser finalizado em novembro de 2018, mas acabou por ser finalizado em 2019. Contou com

a participação de: Centro de Investigação Naval (CINAV), Escola Naval Portuguesa; Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (LSTS) - Faculdade de Engenharias da Universidade do Porto (FEUP); *OceanScan - Marine Systems and Technology*; Academia Naval Polaca; *Bundeswehr Technical Centre for Ship and Naval Weapons, Maritime Technology and Research WTD71*; Universidade de Tecnologia de Cracóvia, *FORKOS R&D Company* e *Industrial Research Institute for Automation and Measurements PIAP*.

No final do SABUVIS I obtiveram-se 3 protótipos o BUV 1(**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**), BUV 2(Figura 1.2) e BUV 3(Figura 1.3) representados nas figuras abaixo:



Figura 1.1 - BUV 1, protótipo desenvolvido pela Universidade de Tecnologia da Cracóvia.

Fonte: (*EDA Expands Swarming Biomimetic UUV Development Program*, 2019)



Figura 1.3 - BUV 3, protótipo desenvolvido pelo CINAV, Escola Naval, FEUP e *Oceanscan*.



Figura 1.2 - BUV 2, protótipo desenvolvido pela Academia Naval Polaca.

1.2.2. SABUVIS II

O principal objetivo desta segunda fase do projeto SABUVIS - SABUVIS II- é desenvolver tecnologia para o controlo de um cardume de veículos de subsuperfície biomiméticos heterogêneos e fortemente cooperativos (Research Technical Proposal - SABUVIS II, 2018; Araújo, 2020). Esse cardume será constituído por dois tipos de unidades, unidades controladoras e unidades executantes. As unidades controladoras serão responsáveis pela navegação, possuindo sensores e equipamentos de comunicações e posicionamento mais desenvolvidos e dispendiosos. As unidades executantes, responsáveis pelo cumprimento de tarefas atribuídas pela unidade

controladora mesmo que para tal tenham que ser comprometidas, serão construídas com sensores mais fracos e um orçamento reduzido, por forma a que a sua perda não tenha impacto na realização da missão prevista. (Paiva, 2020).

Os requisitos desta fase para uma unidade executante são (Paiva, 2020):

- Seja garantida a estanqueidade do veículo;
- O veículo consiga praticar uma profundidade máxima de 10m;
- O veículo seja capaz de navegar autonomamente ou de forma controlada através dum percurso pré-definido;
- Seja garantida uma velocidade de 1m/s;
- Seja possível variar hidrostáticamente a imersão do veículo;
- Seja garantida uma autonomia mínima de 2h;
- Seja garantido um custo reduzido.

1.3. Objetivos da dissertação

Tendo em conta os requisitos citados anteriormente bem como as dissertações efetuadas anteriormente no âmbito do projeto SABUVIS II pelos GMAR EN-MEC Dias de Paiva e pelo GMAR EN-AEL Rocha Araújo, esta dissertação tem como objetivos:

- Projeto, estudo e construção das barbatanas peitorais;
- Desenvolvimento e aplicação de métodos de produção tanto clássicos como inovadores na construção da parte estrutural de todo o veículo;
- Realização de testes de estanqueidade e flutuabilidade;
- Projeto da disposição do hardware no interior do veículo;

- Realização de testes à propulsão.

1.4. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em sete capítulos. No segundo, “Estado da Arte”, é abordada a temática dos UUV e as suas diferentes ramificações na área autónoma e os estudos existentes em relação à propulsão de BUVs. O terceiro, “Barbatanas Peitorais”, será dedicado à fase de projeto e construção das barbatanas peitorais, encontrando-se neste capítulo detalhado o processo de construção do veio, as alterações feitas ao bucim e o projeto da forma da barbatana. O quarto capítulo descreve toda a fase de construção dos componentes exteriores do veículo. No quinto capítulo, “Testes”, são detalhados os testes efetuados ao veículo e algumas simulações realizadas. No sexto capítulo, “Lições Aprendidas e Trabalhos Futuros”, compila todas as grandes dificuldades encontradas ao longo de todo o trabalho em conjunto com as soluções encontradas e propõe possíveis estudos a realizar. Para finalizar apresenta-se a “Conclusão” onde será feita uma apreciação geral do trabalho, serão revistos e analisados os objetivos propostos de forma a perceber qual o resultado final obtido.

2. Estado da Arte

Sabendo que o ser humano tem limitações em ambiente aquático removendo-o do controlo local, revoluciona a maneira de exploração e de navegação possibilitando o desenvolvimento de veículos de controlo remoto ou até mesmo autónomos de menores dimensões e com mais equipamentos.

É com este objetivo em vista que surgem os veículos não tripulados de subsuperfície, em inglês, Underwater Unmanned Vehicle (UUV)¹.

2.1. Introdução aos UUV

Os UUV's são veículos de subsuperfície que não necessitam de tripulação a bordo para os controlar. Estes podem ser controlados por cabos, ligados a costa ou a um navio, sem fios, utilizando ondas radio ou wi-fi ou podem nem ser controlados utilizando Inteligência Artificial (IA) ou um percurso previamente definido. Assim, dentro dos UUV's existem duas grandes classes, os AUV e os ROV's. Dentro dos AUV's existem várias subclasses que podem ser classificados através do seu método de propulsão (Figura 2.1).

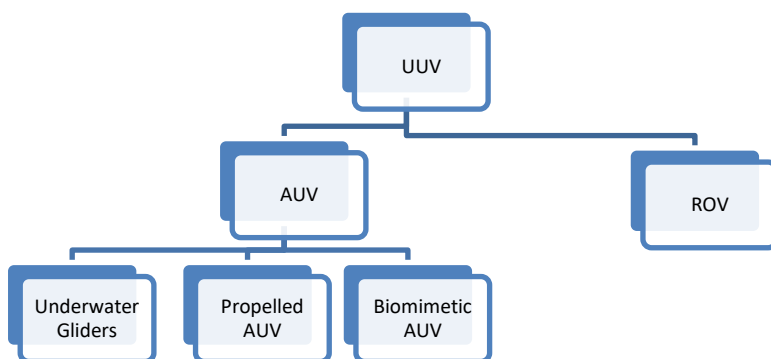


Figura 2.1 Síntese dos vários tipos de UUV

Fonte: (Masmitja et al., 2018)

¹ Os veículos não tripulados de subsuperfície são uma tecnologia que está a maturar rapidamente e que se encontra no limiar de desempenhar um papel fundamental no campo de batalha (Fletcher, 2000).

2.1.1. ROV

Os veículos de controlo remoto, ROV, são veículos submersíveis não tripulados comandados por uma pessoa ou uma equipa tanto em terra como numa embarcação na proximidade. O comando é geralmente feito utilizando um ou vários joysticks, à semelhança dos utilizados nas consolas de videojogos o que torna o seu comando mais simples e intuitivo (*What is an Underwater ROV?*, 2021). O comando é transmitido ao veículo através de sinais elétricos que passam nos vários cabos que fazem a ligação plataforma de comando – veículo. Estes cabos são também responsáveis pelo fornecimento de energia a todo o veículo.

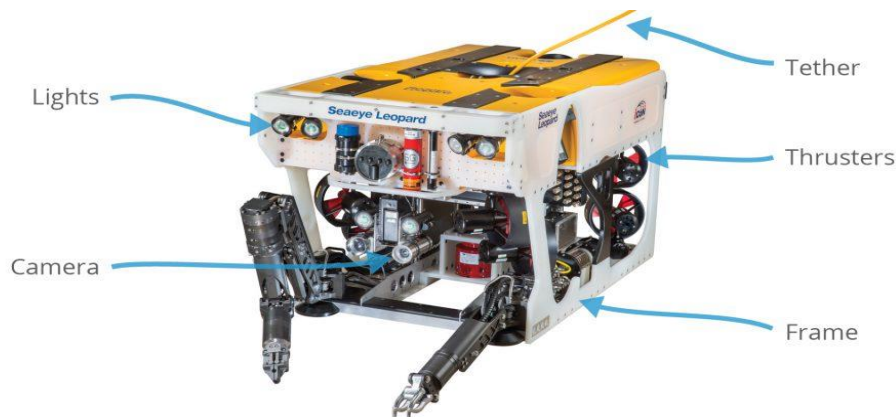


Figura 2.2 - Exemplo de um ROV

Fonte: (*What is an Underwater ROV?*, 2021)

Na sua maioria os ROV's, para além da estrutura, propulsores e cabo, estão equipados com uma ou várias câmaras e luzes para transmitir imagens em direto para o navio. Dependendo da missão a desempenhar podem ser equipados com diversos equipamentos como por exemplo braços mecânicos para a recolha de amostras do fundo do mar ou manipulação de objetos, sensores de pressão, temperatura e salinidade da água, bússola para navegação, sonar para navegação e deteção de objetos, faróis acústicos para o seu posicionamento quando submerso e depósitos para recolha de amostras.

Quanto à sua utilização, é uma tecnologia cada vez mais utilizada em todas as áreas nomeadamente industrial, comercial, científica e militar não só pela sua capacidade de se manter submerso por longos períodos de tempo e dimensões reduzidas, mas também pela sua crescente acessibilidade. Algumas das suas aplicações são inspeções internas e externas de encanamentos submarinos, inspeção de estruturas submersas, inspeção às obras vivas dos navios e a redes de pesca, recolha de amostras de água e objetos e até monitorização de peixes em aquacultura. A nível militar, e tendo sido estes os pioneiros desta tecnologia, são utilizados para guerra anti-minas (*Minewarfare*), inspeção dos cascos de navios suspeitos, busca e salvamento, recolha de objetos e até para treino de mergulhadores.

Apesar de todas as suas qualidades referidas, não é uma tecnologia perfeita e tem algumas desvantagens como o alcance limitado pela dimensão do cabo, que pode ficar preso em alguma estrutura ou algum objeto e que induz também um aumento das forças de arrasto.

2.1.2. AUV

Apesar de terem um conceito semelhante, no que concerne serem veículos não tripulados, resolveram o grande problema dos ROV's que era o seu cabo. Os AUV são veículos autónomos e, portanto, não necessitam de estar conectados por um cabo a uma plataforma de controlo. Estes veículos são programados para a missão a executar ainda antes de serem colocados na água por forma a que após a sua colocação na água prossigam à execução das várias tarefas necessárias à conclusão dessa missão podendo esta ser tão simples como movimentar-se de um ponto a outro e voltar ou fazer vários percursos diferentes evitando obstáculos ao mesmo tempo que recolhem dados do ambiente por onde passam.

Por não possuírem um operador no seu comando, os AUV's, quando comparados com ROV's, são mais complexos. Para poderem tomar as suas decisões de forma autónoma necessitam de mais sensores para a parte da navegação, mais sistemas de comunicações e mais potentes para poderem comunicar a grandes distâncias e necessitam de ter baterias com potência suficiente para alimentar todos esses

equipamentos. Na figura abaixo podemos ver a um exemplo de um diagrama de sistemas de um AUV (Figura 2.3).

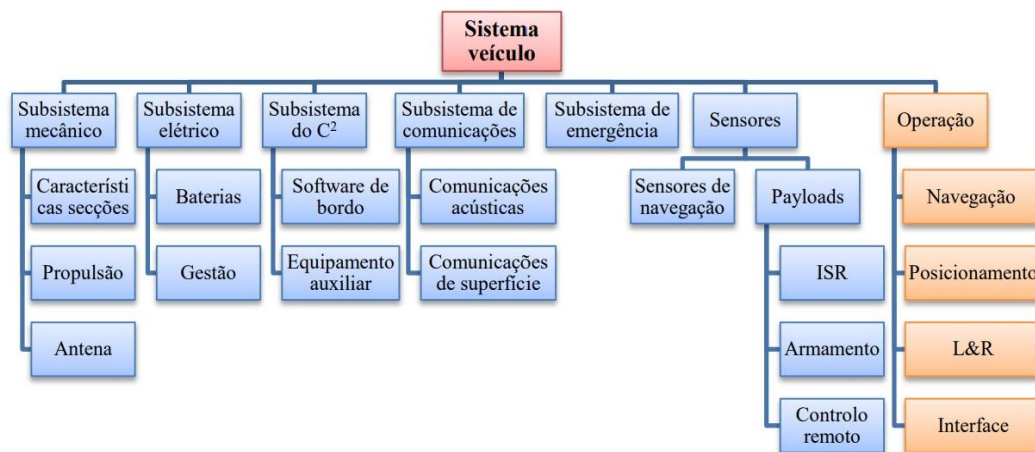


Figura 2.3 Constituição geral de um AUV

Retirado de (Araújo, 2020)

Relativamente à sua aplicação podem ser utilizados em missões de guerra de minas, ISR, vigilância e patrulha portuária, busca e salvamento, ajuda à navegação e comunicação. São missões semelhantes às dos ROV's, contudo os AUV têm a vantagem de não estarem limitados ao alcance de um cabo, sendo capazes de atingir velocidades superiores e facilitando a utilização do pessoal noutras áreas pois não existe a necessidade de estar constantemente a supervisionar ou controlar o veículo.

Contudo ainda existem algumas limitações nomeadamente ao nível da sua autonomia pois dependem de baterias, dos sistemas de comunicações que atualmente ainda não estão otimizados para funcionar debaixo de água e da utilização de IA que é ainda uma tecnologia em maturação.

Tabela 1 – AUV's vs. ROV's: Vantagens e Desvantagens.

VANTAGENS		DESVANTAGENS	
ROV	<ul style="list-style-type: none"> • Controlo total do operador • Uma grande fonte de energia • Transmissão imediata de dados e imagens ao operador • Informação no momento do estado do veículo 	<ul style="list-style-type: none"> • Alcance limitado ao comprimento do cabo • Velocidade limitada • Aumento da força de arrasto devido ao cabo 	
AUV	<ul style="list-style-type: none"> • Maiores alcances • Capacidade de atingir maiores velocidades • Não necessita de uma plataforma de comando e controlo • Menor custo de operação 	<ul style="list-style-type: none"> • Autonomia limitada • Obrigatoriedade da utilização de IA • Comunicações limitadas pelo meio 	

Os AUV's dividem-se em três subclasses (Figura 2.1), planadores subaquáticos, "propelled" AUV e BUUV's. De seguida vão ser explicadas estas subclasses no sentido de melhor compreender o que são e como funcionam sendo também apresentados alguns exemplos atuais.

2.2. Planadores Subaquáticos

2.2.1. O que são?

Os planadores subaquáticos, em inglês, *underwater gliders*, também conhecidos por planadores oceânicos, em inglês, *ocean gliders*, são veículos que se movimentam através da variação do seu deslocamento com o objetivo de recolha de dados científicos. Estes veículos, pelo facto de não necessitarem de apoio enquanto navegam e com capacidade de serem controlados à distância, tornam-se perfeitos para a exploração de locais remotos de forma segura e a um custo relativamente baixo.

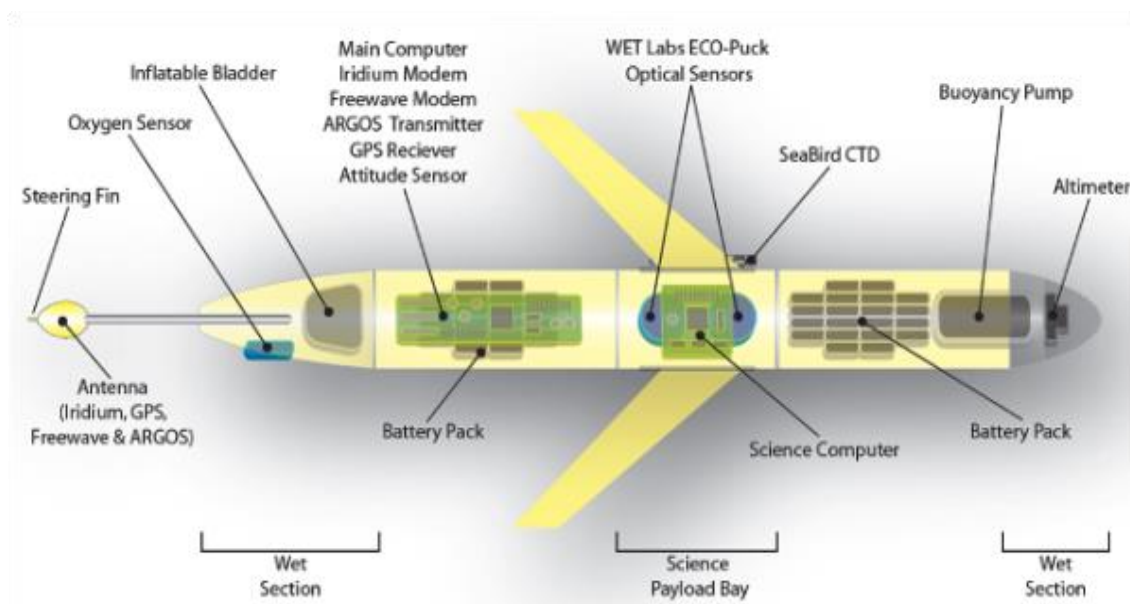


Figura 2.4 - Diagrama do planador Slocum G3.

Fonte: (*Engineering Pacific Marine Environmental Laboratory, 2021*)

Quanto ao arranjo interno são geralmente compostos por um módulo de navegação, que contém os equipamentos necessários à navegação do veículo bem como os sistemas de comunicações, um módulo científico onde estão todos os sensores do veículo utilizados na recolha de dados, barbatanas peitorais e caudais responsáveis pela manobra do veículo e uma antena localizada na cauda do veículo para receber e transmitir informação.

Sendo a sua função primária a recolha de dados hidrográficos e oceanográficos, estão equipados com vários tipos de sensores por forma a recolher informação sobre a temperatura, níveis de salinidade, correntes, níveis de oxigénio, profundidade, entre outros, que posteriormente ajudam a criar uma imagem das condições existentes nas várias zonas monitorizadas que poderiam não ser possíveis através da utilização de satélites ou navios hidrográficos. Devido ao seu sistema de propulsão são capazes de autonomias extraordinárias (13000km ou 18meses).

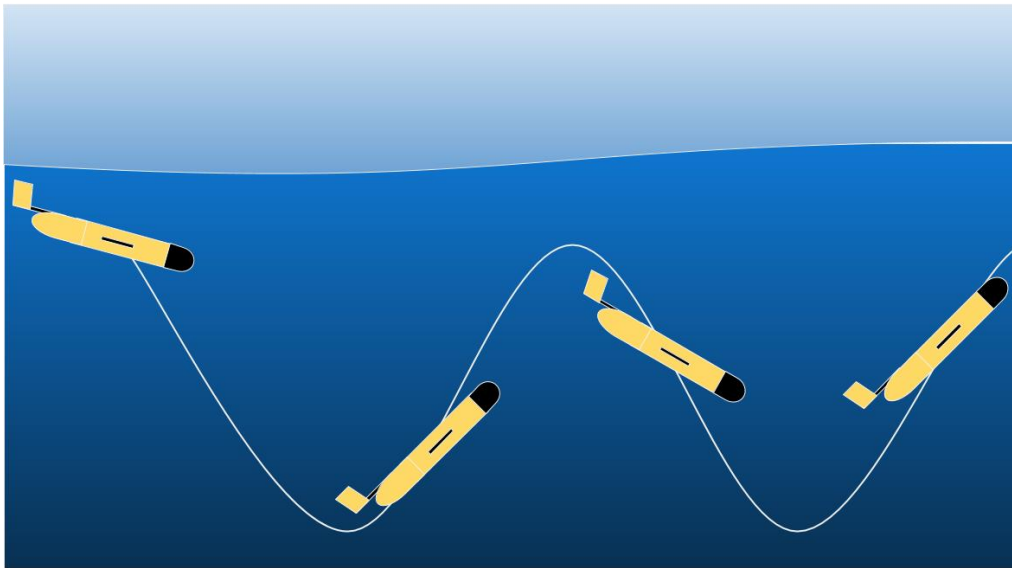


Figura 2.5 - Percurso de um planador enquanto recolhe dados

2.2.2. Funcionamento

Quanto à propulsão, os planadores utilizam uma variação de deslocamento para submergirem ou emergirem conforme necessário. Isto acontece pois, segundo o princípio de Arquimedes “Qualquer corpo imerso num fluído em repouso é submetido a forças de pressão cuja resultante é uma força igual e oposta ao peso do fluído deslocado pelo corpo sendo esta resultante das forças de pressão denominada força de impulsão”, ao variar o deslocamento vai variar diretamente o volume imerso do veículo pois a massa específica do fluido, água, não varia.

$$\Delta = \rho \times \nabla$$

Δ – deslocamento do veículo [kg]

ρ – massa específica do fluído [kg/m³]

∇ – Volume imerso da carena [m³]

Para gerar movimento no plano horizontal são utilizadas as barbatanas peitorais. Variando o seu ângulo de ataque no momento da descida/subida do veículo geram-se forças de sustentação e arrasto que se traduzem no movimento horizontal do veículo (Bachmayer *et al.*, 2004).

A variação de deslocamento pode ser feita de duas maneiras. A primeira, através da admissão ou evacuação de água utilizando uma bomba, Figura 2.4. A segunda, utilizando um óleo de baixa viscosidade e fazendo-o circular entre uma bolsa interna e uma bolsa externa, Figura 2.6. Em ambos os métodos o veículo utiliza a energia das baterias.

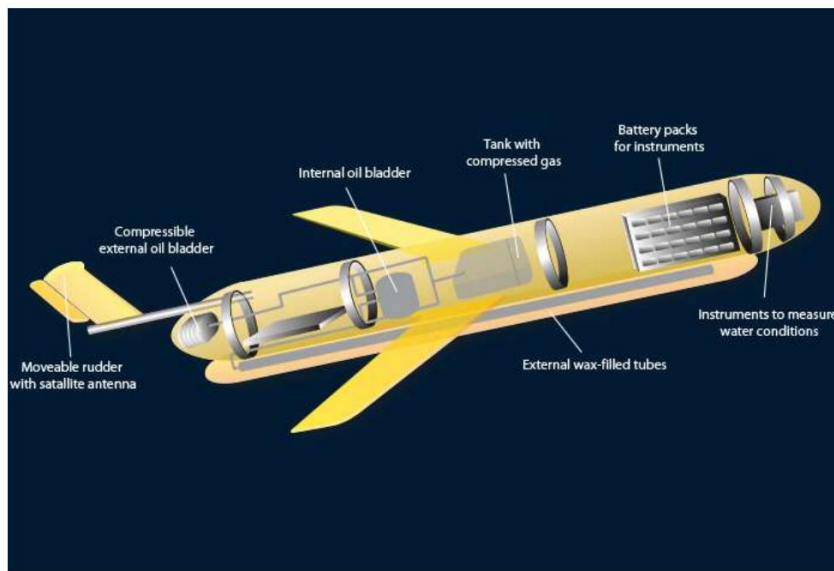


Figura 2.6 - Planador que utiliza um sistema de óleo.

2.2.3 Exemplos de planadores

2.2.3.1 Slocum G3 Glider

O Slocum G3 foi desenvolvido pela empresa Teledyne Marine e já se encontra nos mercados. É um veículo modular capaz de 40 configurações de sensores diferentes para ser capaz de desempenhar missões no âmbito militar, acadêmico e comercial. Após lançado à água pode ser controlado a partir de qualquer parte do globo.



Figura 2.7 - Planador Slocum G3.

Fonte: : (Teledyne Marine, 2021)

Tabela 2 - Características do Slocum G3.

Fonte: : (Teledyne Marine, 2021)

Alcance	350-1200km / 700-3000km / 3000-13000km
Autonomia	15-50dias/ 1-4meses/ 4-18meses
Profundidade	4-1000m
Velocidade horizontal	0.68nós - 2nós
Deslocamento	55-70kg
Dimensões	Comprimento:1.5m; Diâmetro do casco: 22cm

2.2.3.2 Seaglider

O *Seaglider* é um planador desenvolvido pela empresa *Kongsberg*. É um sistema modular capaz de alterar a sua configuração dependendo da missão a desempenhar. Este veículo está preparado para a recolha de dados oceanográficos e hidrográficos, monitorização ambiental, monitorização meteorológica e recolha de dados de organismos biológicos.



Figura 2.8 - Planador Seaglider

Fonte: (Kongsberg, 2021)

Tabela 3 - Lista de especificações do Seaglider.

Fonte: (Kongsberg, 2021)

Autonomia	10meses
Profundidade	1000m
Velocidade	0.5nós
Deslocamento	60kg
Dimensões	Comprimento:1.8m; Diâmetro do casco:330cm

2.3. “Propelled” AUV’s

2.3.1. O que são?

Nesta classe estão englobados todos os AUV com propulsão convencional, isto é, a utilização de uma ou várias hélices para de locomoverem e têm geralmente a forma de um torpedo. Exemplos de tipos de veículo desta classe são os veículos autónomos subaquáticos de longo alcance, em inglês, *Long-range Autonomous Underwater Vehicles* (LRAUVs), dotados grandes autonomias, 1000km (Tethys) e 6000km (AutoSub) por exemplo, e os veículos autónomos subaquáticos leves, em inglês, *Light Autonomous*

Underwater Vehicle (LAUV) que têm como principal objetivo serem facilmente lançados à água, operados e recuperados com um mínimo de equipamento possível por pessoas com especialidades diferentes e sem conhecimentos relacionados com o veículo ou a sua recolha (Madureira *et al.*, 2013).

2.3.2. Funcionamento?

O princípio sobre o qual quase todos os sistemas de propulsão marítima funcionam é através da projeção de uma quantidade de massa de água na direção oposta à qual o navio/veículo se quer movimentar. O mesmo princípio é aplicado a este tipo de AUV que utilizam as hélices com o objetivo de gerar propulsão através do movimento giratório de um conjunto de pás centradas num mesmo ponto criando assim a projeção de massa de água. Para manobrar, guinar, ascender ou descender utiliza as pás laterais alterando o seu ângulo de ataque por forma a aumentar ou diminuir as forças de arrasto e sustentação.

2.3.3. Exemplos

2.3.3.1. Tethys

O *Tethys* é um veículo desenvolvido pela *Monterey Bay Aquarium Research Institute* (MBARI) que completou em 28 de agosto de 2019 150 missões. O seu objetivo de projeto é a execução de missões científicas por períodos de semanas ou meses sem apoio de um navio (Hobson *et al.*, 2012). Atualmente ainda tem apenas 720h(30dias) de autonomia extensível se o veículo entrar em modo “*Sit and Wait*”, que é um modo de economia de bateria, que pode aumentar bastante a sua autonomia (Monterey Bay Aquarium Research Institute, 2019).



Figura 2.9 - LRAUV Tethys desenvolvido pela MBARI's.

Fonte: (Monterey Bay Aquarium Research Institute - Anual Report, 2019)

Tabela 4 - Características do Tethys.

Fonte: (Bellingham *et al.*, 2010)

Alcance	2000km
Autonomia	740h
Profundidade	300m
Velocidade	0.5m/s (1nó)-1.2m/s(2.4nós)
Deslocamento	105kg
Dimensões	Comprimento:2.3m; Diâmetro do casco:31cm

2.3.3.2. Gavia AUV

O Gavia AUV foi desenvolvido pela Teledyne Marines sendo um sistema modular capaz de executar diversos tipos de missões. Em 2008, a Marinha Portuguesa adquiriu um *Gavia 18* e um *Gavia 19*.

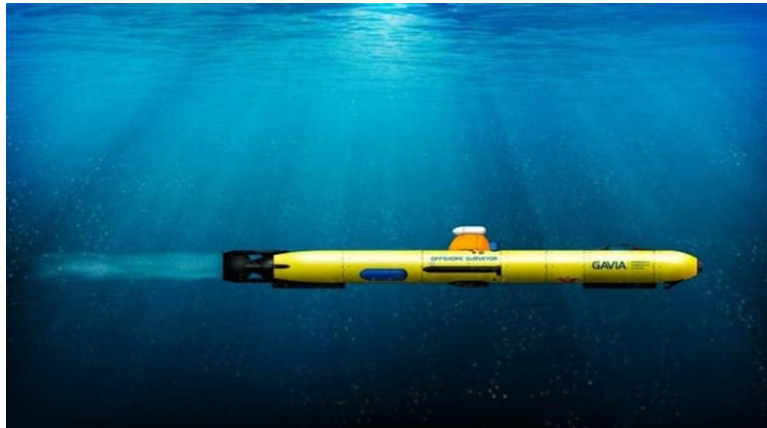


Figura 2.10 – Gavia AUV desenvolvido pela Teledyne Marine.

Fonte: (*NavalNews*, 2021)

Tabela 5 - Especificações do Gavia AUV

Fonte: (*Teledyne Marine*, 2021)

Autonomia	5-8horas
Profundidade	500-1000m
Velocidade	3nós -5.5nós
Deslocamento	50-130kg
Dimensões	Comprimento: 1.8-4.5m; Diâmetro:20cm

2.4. BUV

2.4.1. O que são?

Em primeiro lugar, é importante definir alguns termos que serão utilizados ao longo do texto em relação aos BUV referentes à terminologia anatômica externa dos peixes, Figura 2.11.

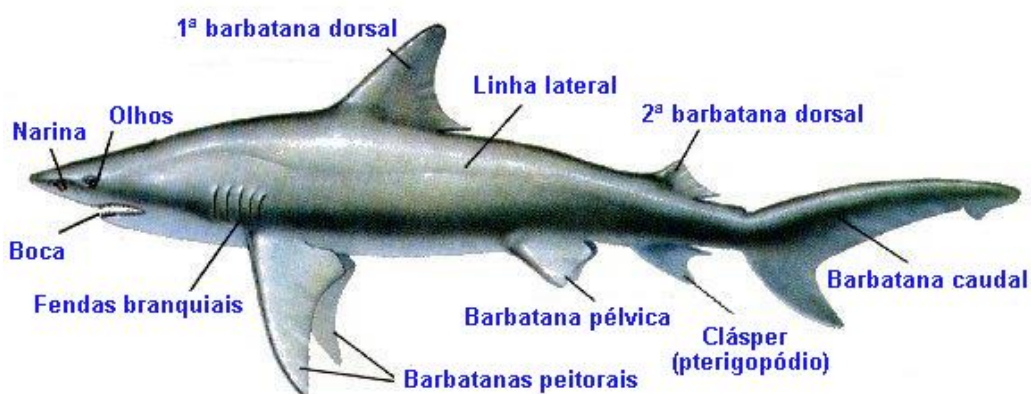


Figura 2.11 - Anatomia externa de um peixe cartilagíneo

Fonte: (Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2021)

Os BUV são uma área relativamente recente dos veículos autónomos de subsuperfície que visam imitar a locomoção de organismos marinhos vivos. Utilizam um modelo de propulsão ondulante, à semelhança dos seus homónimos, sendo que atualmente tem havido avanços não só em protótipos inspirados em peixes, como por exemplo o TwiddleFish desenvolvido pela Duke University e o RoboTuna desenvolvido pelo MIT, mas começaram também a ser desenvolvidos veículos à imagem de outros organismos marinhos como os mamíferos aquáticos (Yu *et al.*, 2007), as raias (Zhang *et al.*, 2018), as lulas (Serchi, Arienti and Laschi, 2013), as enguias (Porez, Boyer and Ijspeert, 2014), etc. Cada um destes organismos com uma complexidade diferente, variando o número de costelas que possuem, a articulação da barbatana peitoral, o sistema de propulsão utilizado, sendo todos eles desafiantes ao nível de projeto e construção.

Tendo em conta que alguns veículos deste tipo têm a capacidade de se movimentar tanto para vante como para ré, têm a potencialidade de alcançar grandes velocidades ou manterem-se a pairar se assim for necessário, possuem um raio de giração menor que os AUV's, o seu sistema de propulsão torna a sua assinatura acústica semelhante à sua contraparte biológica e a sua capacidade de serem interligados num cardume torna este tipo de veículos aptos para todo o tipo de missões (Mazlan, 2015).

2.4.2. Funcionamento?

Ao contrário dos ROV's, AUV's e planadores, que utilizam sistemas de hélices ou de alteração de flutuabilidade para locomoção, os BUV usam as barbatanas caudal e/ou peitorais.

Segundo Sfakiotakis, Lane and Davies (1999), a locomoção dos peixes pode ser classificada em duas categorias com base no tempo dos movimentos:

1. Natação periódica: caracterizada pela repetição cíclica dos movimentos propulsores. É utilizada para percorrer distâncias relativamente grandes a velocidade relativamente constante.
2. Movimentos transientes: podem ser arranques, manobras de fuga ou guinadas. São movimentos curtos e geralmente utilizados durante a caça ou fuga.

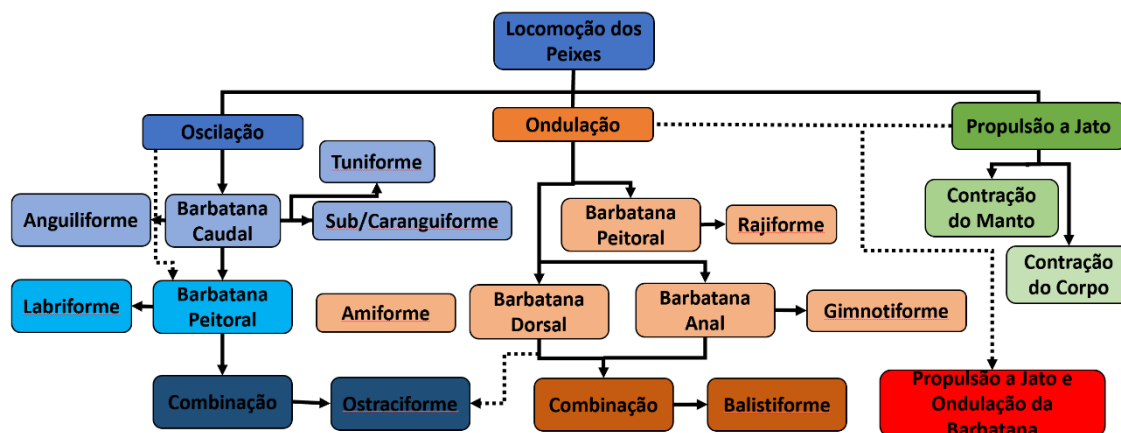


Figura 2.12 - Classificação dos diferentes tipos de locomoção dos BUVs

Fonte : (Salazar *et al.*, 2019)

Existem dois tipos de locomoção, *Body and/or Caudal Fin* (BCF) e *Median and/or Paired Fin* (MPF). Na BCF o peixe utiliza o corpo e/ou cauda para gerar propulsão enquanto a MPF utiliza geralmente as barbatanas peitorais e medianas para propulsão e manobra. Outra distinção existente é em relação ao movimento, isto é, ondulatório, oscilatório ou a jato, Figura 2.13 . No movimento ondulatório é possível visualizar um movimento tipo onda ao longo das partes propulsoras à semelhança das raias por exemplo. Já o movimento oscilatório é gerado tendo um ponto fixo e a barbatana movimentando se em relação a esse ponto, os atuns, por exemplo. Em relação à propulsão a jato como o nome implica é feita através de um jato de água.

Apesar de distintos, os dois primeiros tipos devem ser considerados como contínuos, visto que os movimentos oscilatórios podem tornar-se ondulatórios através do aumento do comprimento de onda da ondulação (Sfakiotakis, Lane and Davies, 1999).

Os peixes podem ser capazes de expressar ambos os tipos de propulsão dependendo das circunstâncias, nomeadamente para altas velocidades podem utilizar BCF, mas trocar para MPF quando necessitam de maior manobrabilidade. Existem autores que defendem que este tipo de classificação não deveria ser utilizado pois um peixe pode utilizar as barbatanas e o corpo em simultâneo².

² “A utilização de ambas as barbatanas em conjunto é evidente durante a manobra e nós recomendamos que se abandone esta divisão artificial entre estes dois tipos de locomoção” (Du, Ruxu; Li, Zheng; Youcef-Toumi, Kamal; Valdivia y Alvarado, 2015)

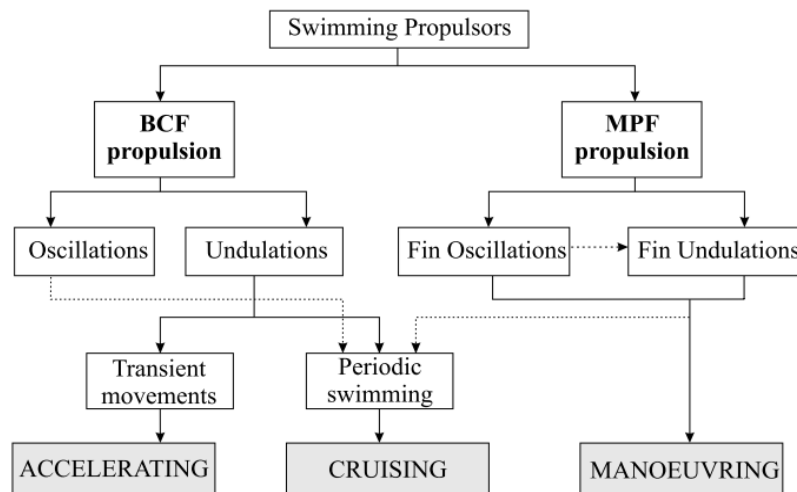


Figura 2.13 - Diagrama síntese com relação entre tipos de propulsão, movimento e as funções para as quais são utilizados.

Fonte: (Sfakiotakis, Lane and Davies, 1999)

Assim e visto que um BUV não é mais que uma imitação humana dos peixes e seres marinhos poderá utilizar qualquer tipo de locomoção citado anteriormente. Para uma informação mais detalhada dos tipos de veículos bem como uma breve descrição das características adotadas e as vantagens em termos de performance consultar (Anexo I e Anexo II).

2.4.3. Exemplos

2.4.3.1. RoboTuna (Charlie I)

Um dos primeiros BUV de que se tem conhecimento é o *RobotTuna* (Charlie I) desenvolvido pelo Massachusetts *Institute of Technology* (MIT) em 1994. É um veículo com 1.25m de comprimento e está conectado a uma estrutura exterior que serve de alimentação e recebe os sinais de comando e controlo. A estrutura da cauda é composta por oito costelas com uma cauda semelhante à de um atum na extremidade. O seu movimento é gerado por seis servos ligados a um sistema de roldanas e cabos (Triantafyllou and Triantafyllou, 1995). Utiliza uma cauda “molhada”, isto é, não tem de

ser estanque, revestida com espuma e lycra que lhe confere uma forma lisa e flexível. O seu objetivo era o estudo da locomoção dos peixes.

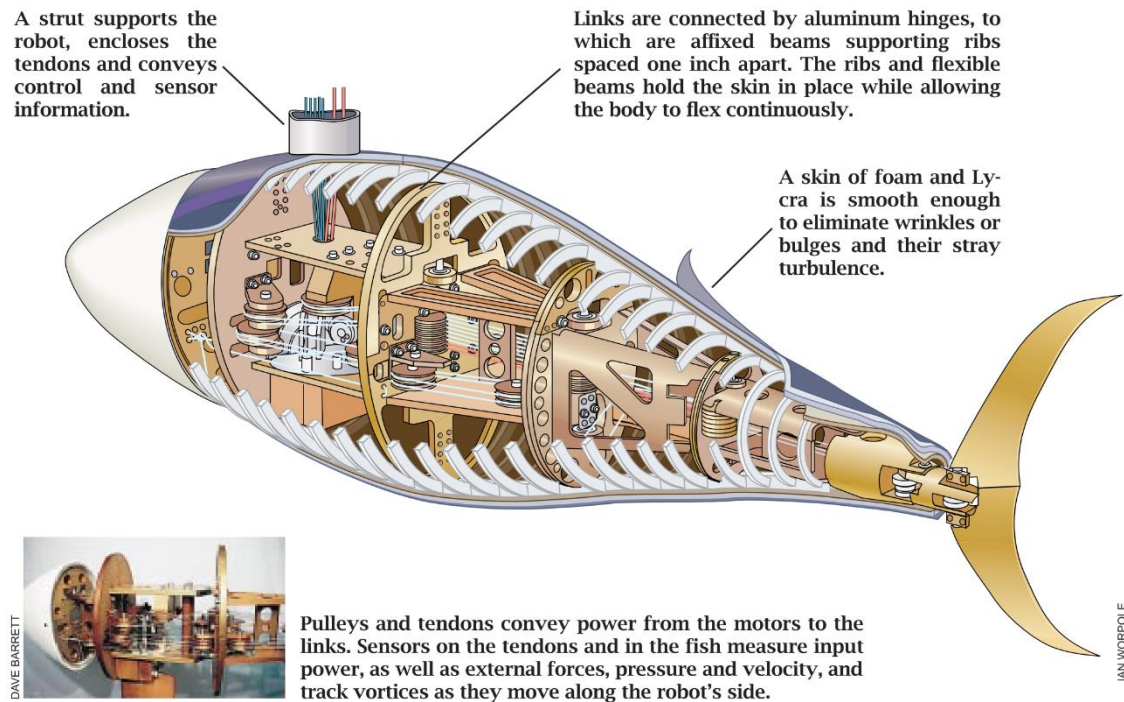


Figura 2.14 – Estrutura interna do RoboTuna.

Fonte: (Triantafyllou and Triantafyllou, 1995)

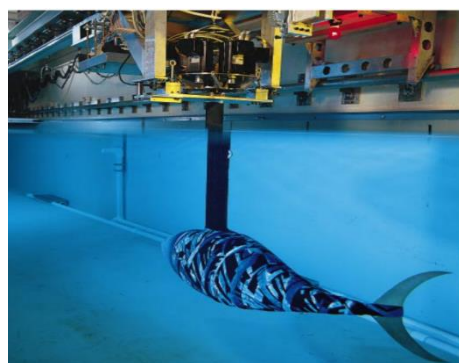


Figura 2.15 - RobotTuna no tanque de testes do MIT.

Fonte: (Triantafyllou and Triantafyllou, 1995)

2.4.3.2. RobotPike

Seguindo as lições aprendidas com o RoboTuna surgiu o RobotPike. Tem 70cm de comprimento e tem apenas três costelas na cauda em vez das oito do seu antecessor. Outra diferença é o facto de poder nadar livremente sem estar conectado a cabos ou suportes, sendo comandado remotamente. O objetivo do desenvolvimento deste veículo era a demonstração de agilidade e manobrabilidade semelhante à dos peixes.



Figura 2.16 - Pike Fish num tanque com um dos seus investigadores, John Kumph.

Fonte: (AUVAC, 2000)

2.4.3.3. BR3

O BR3 foi desenvolvido por William Cuéllar no âmbito da sua dissertação de doutoramento para a universidade de Madrid. Segundo o mesmo, é o primeiro protótipo do género com a habilidade de nadar e manobrar utilizando apenas a sua cauda e corpo (Hern, 2015). Ao contrário da generalidade dos AUV's este não possui partes móveis sendo movido por ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloy-SMA*) sendo ideal para exploração a grandes profundidades. Uma particularidade deste veículo é a sua dimensão de apenas 263mm. Isto deve-se à utilização de SMA que podem ser utilizados diretamente como atuadores não necessitando de servos nem ligações extra e que têm um volume desprezável (ex. 3 mm^3). O material usado para o esqueleto

e suporte dos SMA foi o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) material com bastante resistência a impactos e à corrosão. Por fim para impermeabilizar a cauda foi utilizada uma mistura de componentes, um estrutural e um de proteção. Para o estrutural foi adotada uma malha de microfibras de licra e para proteção duas camadas de silicone líquido.

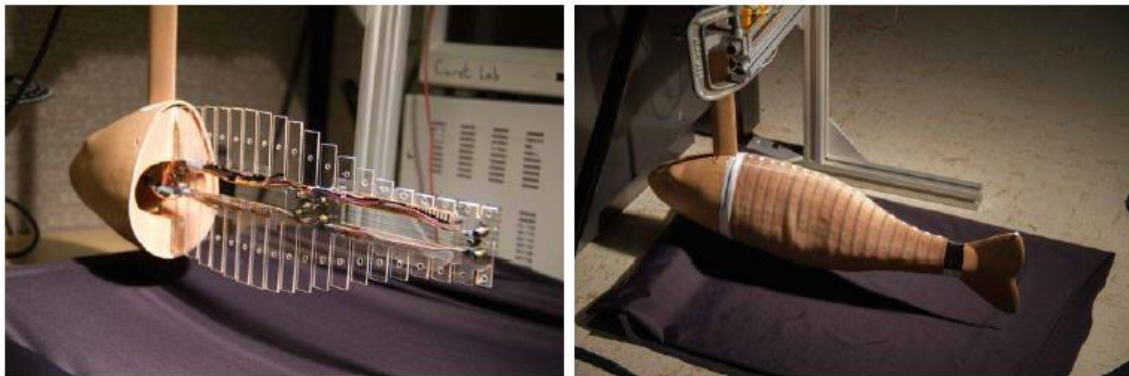


Figura 2.17 - BR3 a executar testes num túnel de vento.

Fonte: (Hern, 2015)

2.4.3.4. RoboSalmon v2.0

O *RoboSalmon* v2.0 foi desenvolvido pela Universidade de Glasgow com o objetivo de comparar o sistema de propulsão biomimético com um sistema de hélice e leme através da recolha de dados experimentais. É um veículo modelado a partir das dimensões reais de um salmão atlântico adulto, tendo um comprimento de 0.85m e pesando 4.88kg. O veículo está dividido em duas secções: o corpo onde estão os sensores, baterias e outros sistemas e a cauda que é utilizada para propulsão (Watts, 2009). O corpo do veículo foi construído em alumínio onde foram fixados três invólucros para os componentes eletrónicos. Este veículo possui duas barbatanas peitorais feitas de fibra de vidro atuadas por dois servos. A cauda é constituída por dez costelas feitas

em PVC atuadas por um único servo e têm uma cobertura feita de nylon revestido por latex líquido.

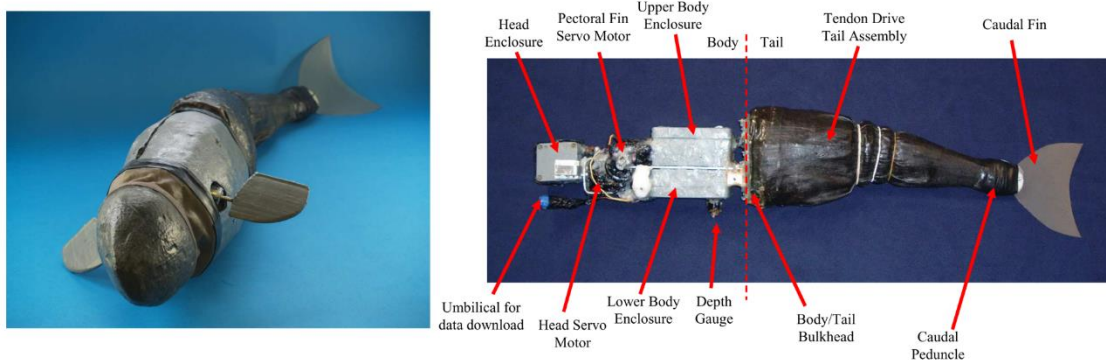


Figura 2.18 – *RoboSalmon v2.0 com cauda.*

Fonte: (Watts, 2009)

2.5. Projeto de Veículos Biomiméticos

Sendo os BUV's sistemas complexos de projetar e construir, existe a necessidade de realizar diversos estudos antes, durante e após a sua construção por forma a garantir que quando passar de protótipo a um veículo operacional se comporte como previsto e cumpra com todos os requisitos, funções e missões para os quais foi projetado.

Como é possível verificar na Figura 2.19 qualquer projeto segue a seguinte sequência:

1. Inicia-se com um estudo sobre a natação dos peixes/forma de locomoção dos organismos que se deseja imitar bem como a utilização de modelos matemáticos simplificados³.

³ “Independentemente do protótipo, é necessária uma análise detalhada do movimento do animal bem como o desenvolvimento de um modelo matemático simples.” (Przybylski, 2019)

2. De seguida escolhem-se parâmetros a seguir relacionados com as características a imitar do organismo real.

3. Após essa fase inicial passa-se para a parte do desenho e modelos de simulação tendo em conta os requisitos definidos anteriormente. Nesta fase são realizados estudos utilizando softwares de análise de fluidos (Computational Fluids Dynamics - CFD) para verificar o estudo analítico feito anteriormente bem como obter uma imagem das forças presentes e potenciais problemas a corrigir como tensões ou pontos de fadiga. É também nesta fase que se escolhem os materiais a utilizar e se testam os sistemas de controlo através de simulações.

4. De seguida, após resolver os problemas que surgiram no desenho em *Computer Aid Design* (CAD) passamos para a fase de construção e calibração de aparelhos de controlo.

5. Por fim vem a fase de testes a realizar a todo o veículo e sistemas.

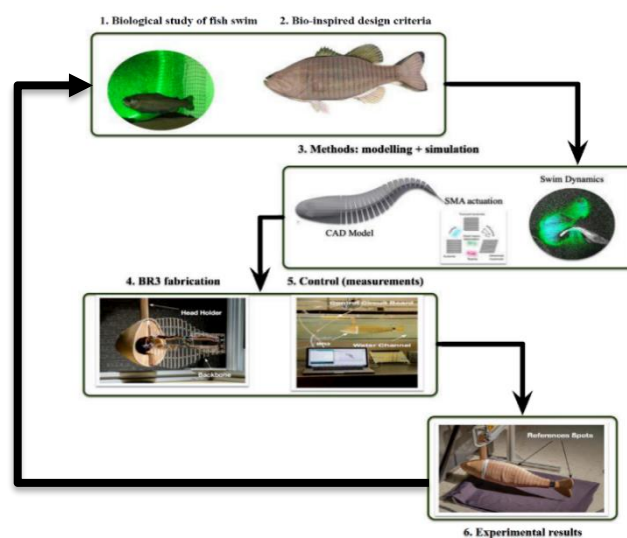


Figura 2.19 - Fases do projeto e construção de um BUV

Fonte: Adaptado de (Hern, 2015)

Todas estas fases são iterativas o que significa que no fim dos testes volta-se à fase inicial e repete-se o processo desta vez corrigindo os problemas que surgiram e melhorando o veículo sempre na procura do veículo “perfeito”.

2.6. “TOBIAS”

Em 2019 a Escola Naval iniciou-se no projeto SABUVIS II com as dissertações de mestrado realizadas pelos GMAR EN-MEC Dias de Paiva, *“Desenvolvimento de um Veículo Autónomo Biomimético: Desenvolvimento da Estrutura e Mecanismo de Propulsão Alternativo”* e GMAR EN-AEL Rocha Araújo, *“Projeto e desenvolvimento de um veículo autónomo biomimético de subsuperfície: Projeto e desenvolvimento do hardware e software”*, no projeto inicial e os primeiros passos na construção do TOBIAS (*Transformable and Optimizable Biomimetic Innovative Autonomous System*).

Durante esse período foram definidos todos os requisitos do veículo e, tendo por base lições aprendidas durante o SABUVIS I, foi feito o projeto inicial do veículo obtendo-se Figura 2.20 .

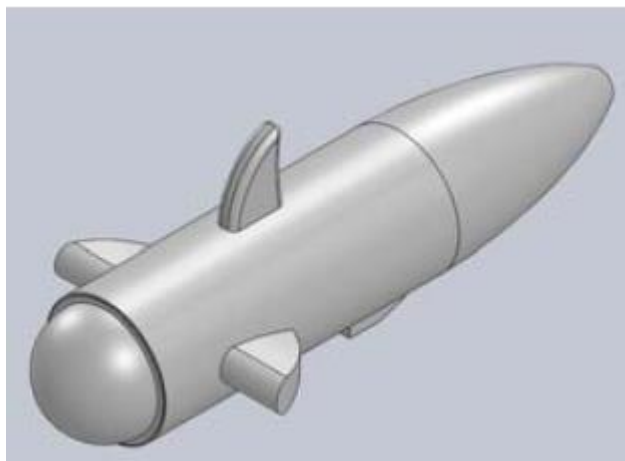


Figura 2.20 - Primeira versão do TOBIAS

Retirado de (Paiva, 2020)

A partir deste primeiro conceito foram em simultâneo projetadas as partes mecânicas, a arquitetura/estética, estrutura, energia, e a eletrônica, sistemas e sensores, do veículo. Da parte mecânica foi projetada toda a estrutura, corpo principal, parte frontal e barbatana dorsal (Figura 2.21), o sistema de flutuabilidade (Figura 2.22), a instalação propulsora (Figura 2.24), as barbatanas peitorais e a cobertura traseira/cauda.

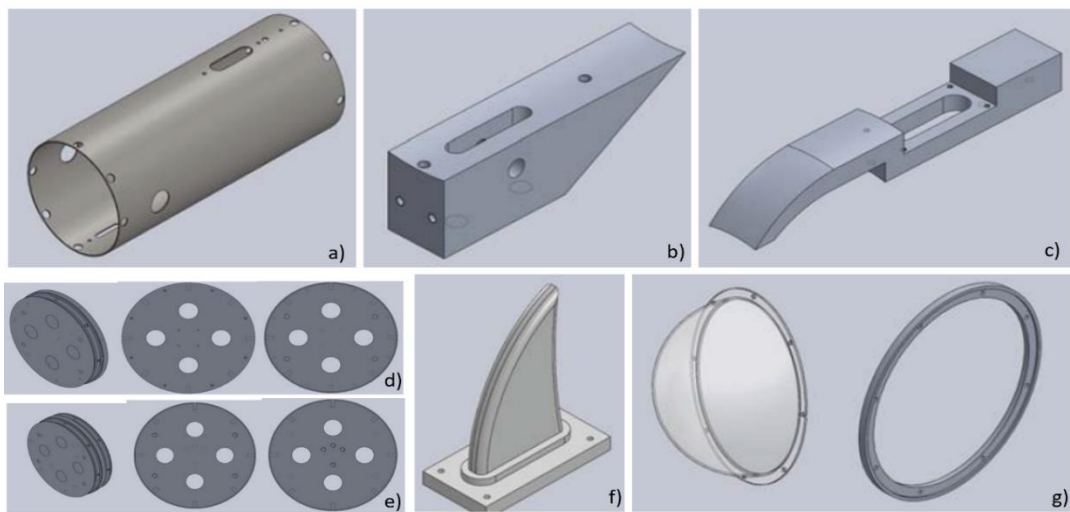


Figura 2.21 - a) Cilindro Central; b) Base dos Sensores do Cilindro Central; c) Pega do Cilindro Central; d) Disco Estrutural AV; e) Disco Estrutural AR; f) Barbatana Dorsal; g) Cobertura Frontal.

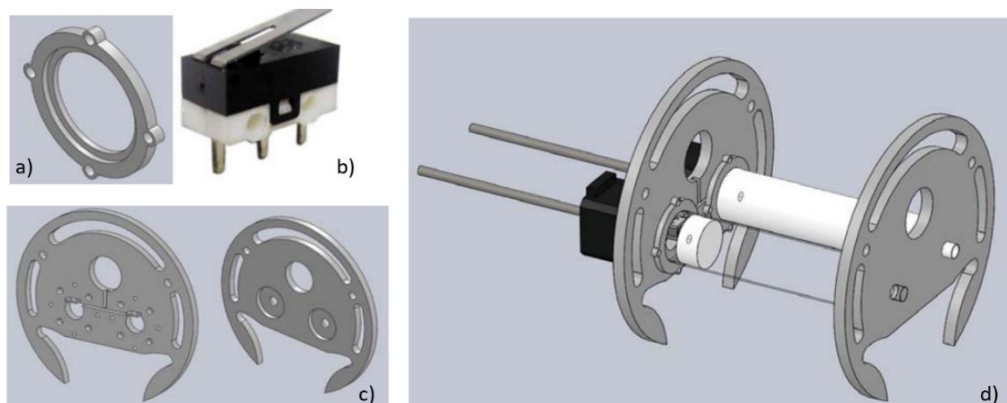


Figura 2.22 – a) Peça de acoplamento Seringa/estrutura; b) Fim-de-curso; c) Estruturas de Suporte dos Tanques de Flutuabilidade; d) Sistema de flutuabilidade.

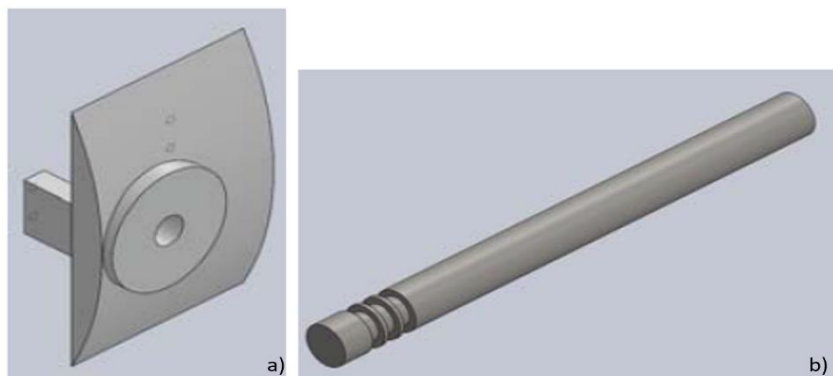


Figura 2.23 - a) Bucim do veio; b) Veio da barbatana.

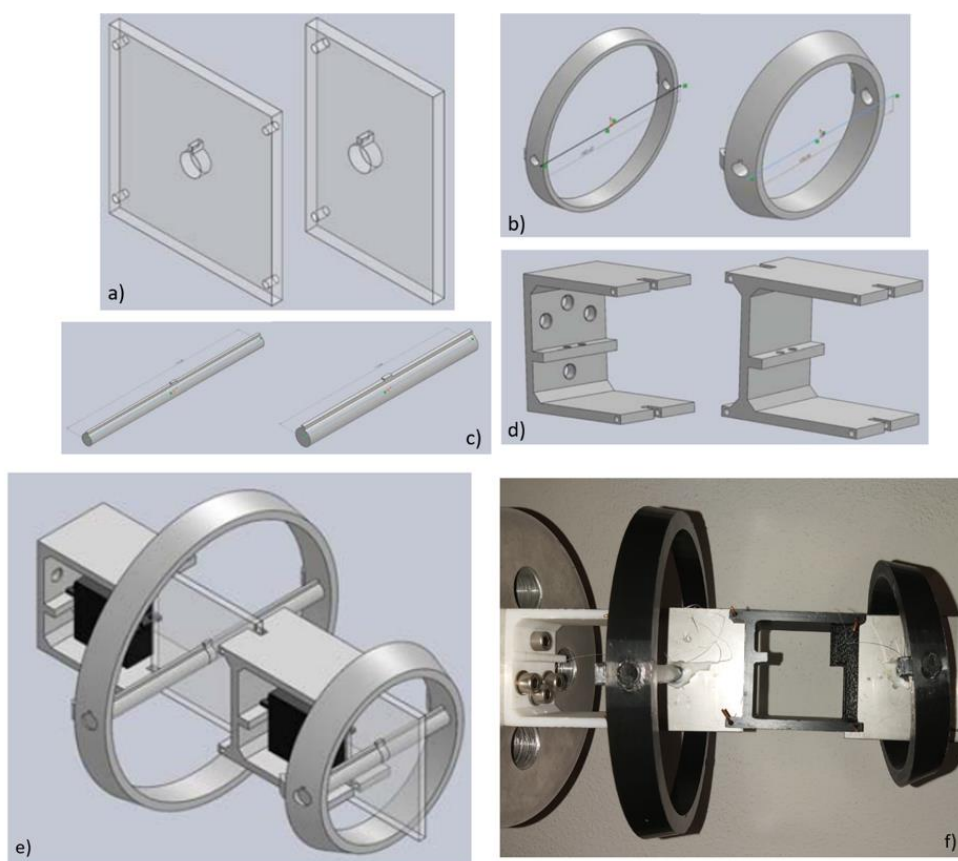


Figura 2.24 – Placa anterior e posterior; b) Costelas em PLA; c) Conectores dos servos em PLA; e) Instalação propulsora completa; f) Instalação Propulsora montada.

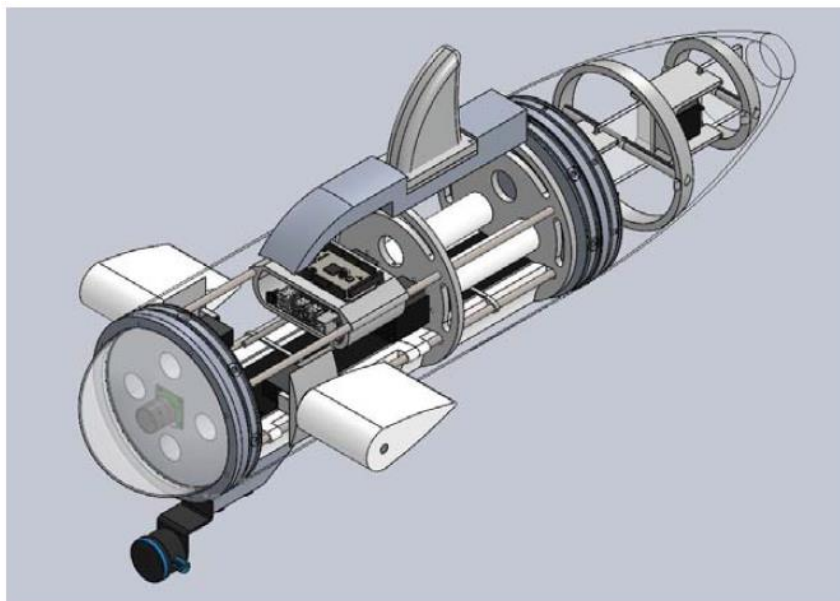


Figura 2.25 - Imagem final do protótipo.

Relativamente a esta parte foram realizados estudos de potência para a aquisição das baterias e dos servos mais adequados para a instalação propulsora e sistema de flutuabilidade. Tendo em conta a Figura 2.25 e o sistema de lastro implementado foi realizado o estudo da flutuabilidade do veículo obtendo-se o centro de impulsão e o centro de massa, fundamentais no projeto de qualquer veículo marítimo. Tendo em conta as necessidades e requisitos do veículo, este foi dividido em seis módulos diferentes (Tabela 6): Comunicações, Navegação, Limitação e Avarias (LA), RECON, Locomoção e Potência. Para cada um destes módulos foram selecionados os vários sensores e componentes eletrónicos que mais se adequavam às necessidades.

Tabela 6 - Resumo do hardware e respectivos módulos em que se encontram.

Fonte: (Araújo, 2020)

Módulo de hardware	Tipo de equipamento	Equipamento	Empresa produtora
Micro PC	PC principal	<i>Jetson Nano Development Kit</i>	<i>NVIDIA</i>
Comunicações	GSM	<i>SIM800L GSM-GPRS 5V V2.0</i>	<i>RoHS</i>
Comunicações	Modem Acústico	<i>Micromodem</i>	<i>WHOI</i>
Comunicações	WiFi	<i>Bullet BM2HP</i>	<i>Ubiquiti</i>
Navegação	Sensor de pressão	<i>Bar30</i>	<i>BlueRobotics</i>
Navegação	AHRS	<i>VN-100T Development Kit</i>	<i>VectorNav</i>
Navegação	GNSS	<i>NEO-7M</i>	<i>Ublox</i>
Navegação	Eco-sonda	<i>Ping Sonar Altimeter and Echosounder (Ping1D)</i>	<i>BlueRobotics</i>
LA	<i>Sensor de alagamento</i>	<i>SOS Leak Sensor</i>	<i>BlueRobotics</i>
RECON	<i>Sonar</i>	<i>Ping360 Scanning Imaging Sonar</i>	<i>BlueRobotics</i>
RECON	<i>Câmara</i>	<i>8mP Sony IMX219</i>	<i>Arducam</i>
Locomoção	<i>Microcontrolador</i>	<i>Mega 2560</i>	<i>Arduino</i>
Locomoção	<i>BCU Stepper Driver</i>	<i>MP6500</i>	<i>Pololu</i>
Locomoção	<i>Módulo de relés</i>	<i>Módulo Relé 5V 4 Canais</i>	<i>Hong Wei</i>
Potência	<i>Sensor de medição de corrente</i>	<i>ACS712T</i>	<i>MicroSystems</i>
Potência	<i>Sensor de medição de tensão</i>	<i>B25</i>	<i>Eieship</i>

Após esta fase de projeto foram adquiridos e maquiados os componentes mecânicos descritos anteriormente tendo ainda sido iniciada a construção do veículo.



Figura 2.26 - Estado do veículo no início da presente dissertação

Assim, esta dissertação tem como ponto de partida um veículo com uma forma bem definida, um sistema eletrônico pronto a montar, mas com vários detalhes de projeto, construção/produção e toda uma série de testes por desenvolver, fundamentais para o sucesso do veículo.

3. Projeto e Estudo das Barbatanas Peitorais

As barbatanas peitorais são barbatanas essencialmente utilizadas para manobrar mas podem também servir como mecanismo de propulsão a baixas velocidades dependendo se o peixe utiliza propulsão MPF ou BCF. Contudo nos peixes do tipo *Carangiforme*, família à qual pertence o veículo, as barbatanas peitorais têm pouca influência na propulsão e na velocidade a que o peixe consegue manobrar sendo ambas as funções realizadas essencialmente pela barbatana caudal (Du, Ruxu; Li, Zheng; Youcef-Toumi, Kamal; Valdivia y Alvarado, 2015). Neste veículo decidiu-se que as barbatanas peitorais terão duas funções primárias, a atenuação do cabeceio e balanço e em conjunto com o sistema de flutuabilidade, a alteração da profundidade do veículo através da variação do seu ângulo de ataque. Contribuirão também para a manobrabilidade do veículo tal como é possível verificar em testes realizados por (Du & Li, 2015) onde verificaram que apesar de estas barbatanas não influenciarem muito a velocidade de manobra diminuem o raio de giração pelo facto de aumentarem a resistência num dos bordos, sendo assim uma mais-valia para a manobrabilidade geral do veículo.

Apesar de nem sempre terem uma função ativa na propulsão, como é o caso neste veículo, estas barbatanas são fundamentais para a hidrodinâmica do veículo e para uma propulsão mais eficiente. “Um mecanismo importante e intrigante associado a uma natação de alto desempenho é a criação de anéis de vórtice e a reciclagem da energia do vórtice é explorada pelos peixes. Por exemplo, um par de barbatanas peitorais em abdução causa a formação de uma esteira, na qual barbatana caudal do peixe poderá reciclar a energia dos vórtices criados. A interação do vórtice entre diferentes superfícies de controle (por exemplo, barbatanas peitorais e cauda) facilita a geração de impulso.” (Du, Ruxu; Li, Zheng; Youcef-Toumi, Kamal; Valdivia y Alvarado, 2015)

O movimento e forma das barbatanas peitorais dos peixes é muito semelhante ao das asas dos pássaros, podendo este ser um ponto de partida para a criação da barbatana peitoral do veículo. Tendo isto em consideração é importante em primeiro

lugar perceber o movimento a realizar pela barbatana. Assim, este pode ser decomposto em quatro movimentos distintos: remada, rotação, batimento e abertura. (Du, Ruxu; Li, Zheng; Youcef-Toumi, Kamal; Valdivia y Alvarado, 2015)

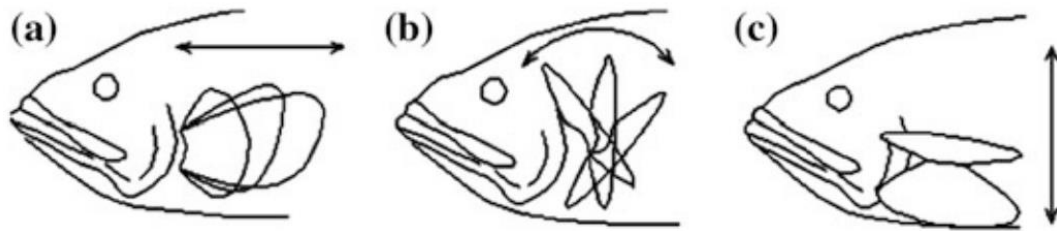


Figura 3.1 - Movimento das barbatanas peitorais: a) Remada (*Rowing*); b) Rotação (*Feathering*); c) Batimento (*Flapping*).

Fonte : (Du, Ruxu; Li, Zheng; Youcef-Toumi, Kamal; Valdivia y Alvarado, 2015)

A grande diferença entre os movimentos está relacionada apenas com o eixo do movimento de rotação da barbatana. Se a barbatana estiver paralela ao peixe é batimento, se estiver perpendicular é remada. Como, para este veículo, as barbatanas não terão nenhuma função de propulsão é aceitável apenas considerar e implementar o movimento de rotação.

Em segundo lugar, para a forma das barbatanas não existe melhor ponto de partida do que a forma já utilizada em aeronaves visto já serem mecanismos estudados, implementados e construídos na atualidade.

3.1. Perfil da barbatana

Numa primeira fase foi revisto o projeto realizado pelo GMAR EN-MEC Dias de Paiva na sua dissertação, nomeadamente a barbatana peitoral, bucim e veio (Figura 2.23). Após esta revisão decidiu-se que o ponto de partida seria a forma da barbatana pelo facto de ser um aspeto pouco explorado anteriormente.

Existem alguns conceitos que são importantes compreender antes de avançar nomeadamente a nomenclatura associada a um perfil alar (*airfoil*) bem como alguns conceitos físicos.

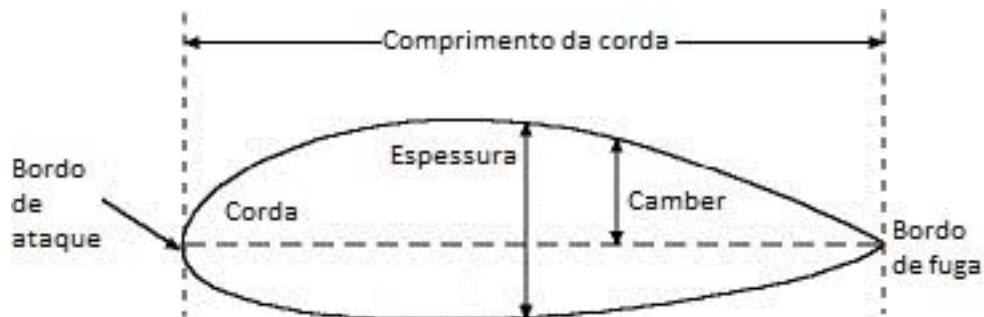


Figura 3.2 - Nomenclatura de um perfil alar.

Fonte: Adaptado de (Carlton, 2007)

A força de arrasto, em inglês *drag force*, pode ser descrita como a força oposta à direção de movimento. Sendo uma força geralmente prejudicial ao movimento, em determinados tipos de natação pode ser utilizada para gerar propulsão, através de 3ª lei de Newton em que quando um objeto exerce uma força numa superfície/objeto essa força é exercida com mesma intensidade, mas direção oposta. Esta força pode também ser utilizada para alterar a trajetória do movimento.

A força de sustentação, em inglês *lift force*, é uma força perpendicular à direção do movimento. Por exemplo, quando um avião pretende levantar voo é esta a força que tem de vencer a força da gravidade. Utilizando uma asa do tipo alar assimétrico, o escoamento de ar vai ser maior na parte superior, causando uma diminuição da pressão do ar nessa zona resultando numa maior sustentação. Este fenómeno pode ser explicado pelo princípio da continuidade em conjunto com a equação de Bernoulli. A primeira diz-nos que o produto da densidade, ρ , área da secção, A , e velocidade, v , tem de ser constante.

$$\rho \times A \times v = constante \quad (1)$$

A lei de Bernoulli diz que qualquer aumento de velocidade, v , causa uma diminuição da pressão, P e vice-versa. Portanto quanto maior a velocidade menor a pressão.

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 = constante \quad (2)$$

Assim quando o fluxo de fluído passa na asa, vai haver uma maior deslocação de fluído na parte superior da asa, aumentando a velocidade do fluxo nessa parte. Apesar da velocidade de fluxo também aumentar na parte inferior, vai aumentar muito mais na parte superior. Esse aumento de velocidade resulta numa diminuição da pressão causando uma diferença de pressões positiva entre a parte inferior e superior resultando numa força com sentido vertical denominada de força de sustentação (*Theory of Flight*, 2021).

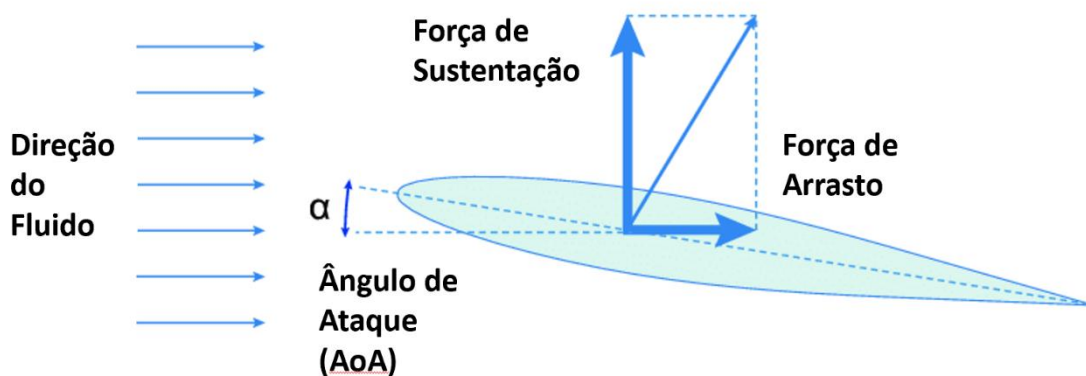


Figura 3.3 - Aplicação das forças de arrasto e sustentação

Tendo em consideração os aspetos mencionados optou-se por um perfil do tipo NACA. A NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*), era uma agência norte-americana responsável pelo estudo da aeronáutica tendo criado várias aeronaves e realizando testes em tuneis de vento. Para simplificar o projeto de aeronaves foram desenvolvidos e testados vários perfis *airfoil* para as asas e hélices (NASA, 2021). Atualmente, apesar da NACA ter sido dissolvida tendo as suas funções sido transferidas para a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) o nome dos perfis manteve-se NACA.

Existem perfis NACA de quatro e de cinco dígitos que definem o camber ou curvatura, a posição máxima da curvatura e o valor da espessura (Figura 3.4).

NACA MPXX

Exemplo: NACA 2412

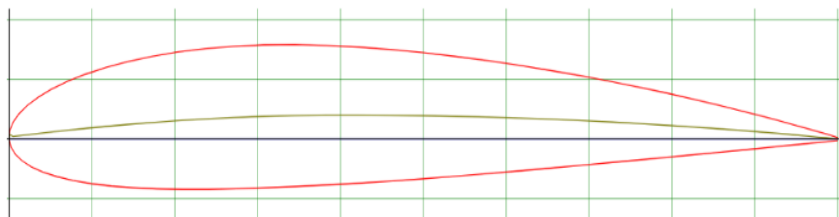


Figura 3.4 - Explicação e exemplo:

M- Valor máximo da curvatura dividido por 100. Ex.: M=2 o que significa curvatura de 0.02 ou 2% da corda.

P- Posição onde se encontra o valor máximo da curvatura dividido por 10. Ex.: P=4, a máxima curvatura encontra-se em 0.4 ou 40% da corda.

XX- Valor da espessura dividido por 100. Ex.: XX=12, espessura de 0.12 ou 12% da corda.

Fonte: Adaptado de (*Airfoil Tools*, 2021)

Tendo em conta a vasta biblioteca de perfis existente e visto que qualquer um destes perfis poderia trazer vantagens ao veículo optou-se por um perfil que fosse simétrico e sobre o qual houvesse estudos de dinâmica de fluidos, fatores importantes para futuros estudos da barbatana. Selecionou-se o perfil NACA 0012. Este perfil tem 0% curvatura, logo é simétrico, 225 mm de corda e 12% espessura que corresponde a 27 mm. Para o seu desenho recorreu-se ao website *NACA 4 Digit Airfoil Generator* (Airfoil Tools, s.d.) utilizando posteriormente o software *SolidWorks* para o seu projeto a 3-D.

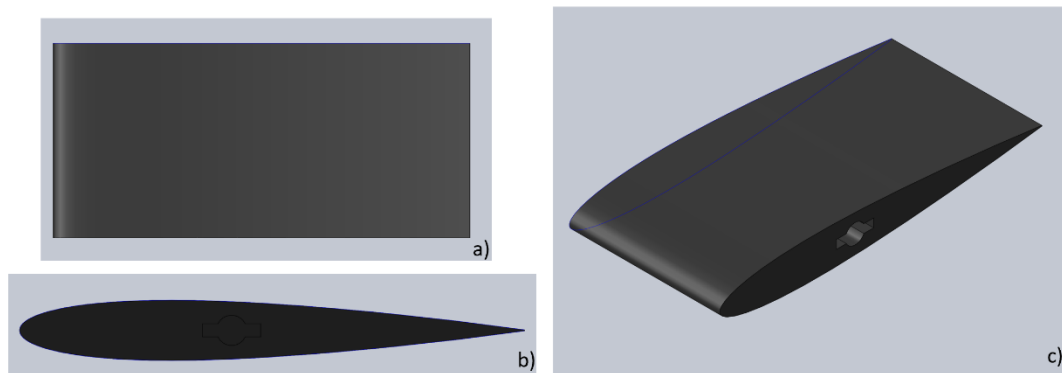


Figura 3.5 – Barbatana Peitoral v1 a) Plano Superior; b) Vista Lateral; c) Vista geral.

Sendo um procedimento habitual, o material escolhido foi o PLA precisamente pelo seu baixo custo (ex.: em relação a uma barbatana de mergulho, utilizada no BUV3), por ter a rigidez necessária, pela sua baixa densidade e por poder ser produzida, maquinada e alterada de forma autónoma e independente na Escola Naval com recurso a impressão 3D.

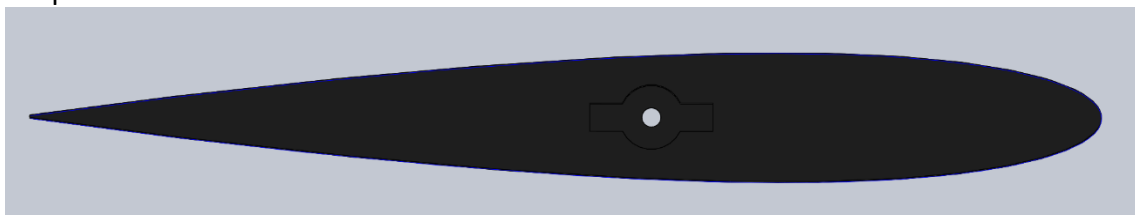


Figura 3.6 - Barbatana Peitoral v2

Por fim, decidiu-se tornar esta barbatana modular, isto é, em vez de ser colada ao veio como projetada inicialmente, esta será fixada ao veio com recurso apenas a um parafuso M4x 25mm na sua extremidade o que permitirá a sua fácil substituição. Numa situação operacional isto é uma vantagem pois permite a substituição de barbatanas no local de operação, tarefa que pode ser necessária caso esta sofra qualquer tipo de dano, recorrendo a um mínimo de ferramentas. Para a Escola Naval permite o estudo de vários tipos de barbatanas com variadas formas utilizando sempre o mesmo veículo.

3.2. Bucim do veio da barbatana peitoral

O bucim é uma peça fundamental para garantir a estanqueidade do veículo. Tem como funções a vedação entre o veículo e o veio bem como o suporte do servo que vai dar movimento ao veio. Por forma a acomodar as alterações feitas ao veio, alterou-se também o bucim original aumentando o diâmetro da entrada para 38mm, diâmetro externo 39.8mm e adaptando o suporte do servo a este diâmetro.

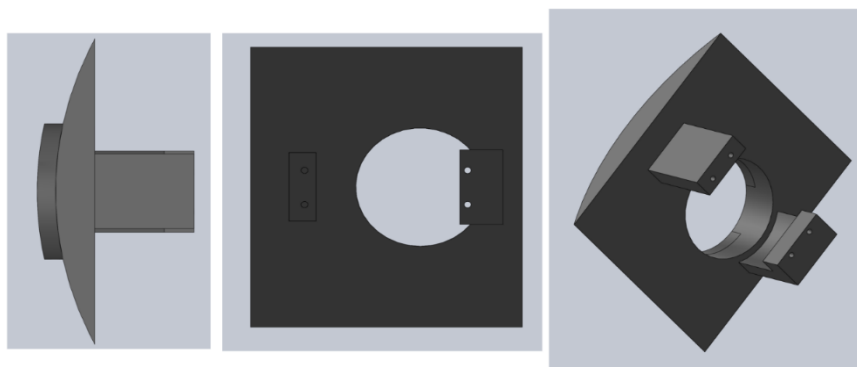


Figura 3.7 - Bucim v1

Esta solução dimensional tinha um problema, a zona de vedação (recorrendo a o-rings) era demasiado pequena não permitindo vedação necessária. Procedeu-se ao aumento da zona de o-rings de 15.59mm para 20mm.

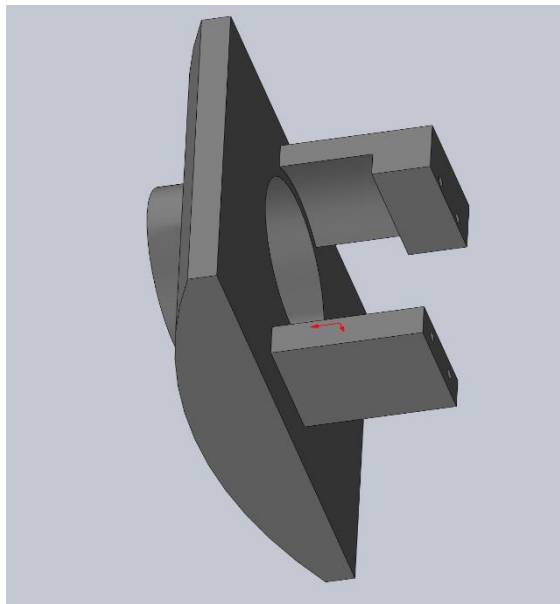


Figura 3.8 - Bucim do veio v2

Após a realização de alguns testes verificou-se que os suportes de fixação do servo começavam a rodar devido às forças aplicadas pelo servo. Assim procedeu-se à alteração desses suportes para um suporte onde o servo é encaixado e não tem espaço para se movimentar (Figura 3.9).

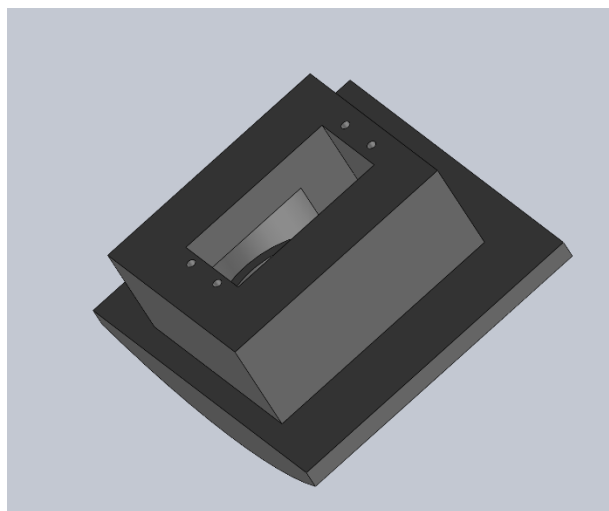


Figura 3.9 – Bucim do veio v3.

Para finalizar o projeto da barbatana peitoral procedeu-se ao desenho e estudo do veio.

3.3. Veio da barbatana peitoral

O veio tem duas funções, transmitir o movimento do servo para a barbatana e atuar como vedante da zona onde está inserido. Para o projeto inicial teve-se em consideração o trabalho desenvolvido anteriormente, mas principalmente os servos adquiridos pois estes têm um conjunto de acessórios que podem ser utilizados para fazer a ligação servo-veio. Assim, tendo em conta estes acessórios, definiram-se alguns requisitos que a ligação tinha de cumprir:

- Ser centrada, isto é, o ponto de rotação ser no centro do veio pois quanto menor a distância ao centro menor o binário necessário para rodar o veio;

- Ter o maior número possível de pontos de aplicação pois assim tem uma maior aderência e área de contacto, logo seria possível uma melhor distribuição de forças.

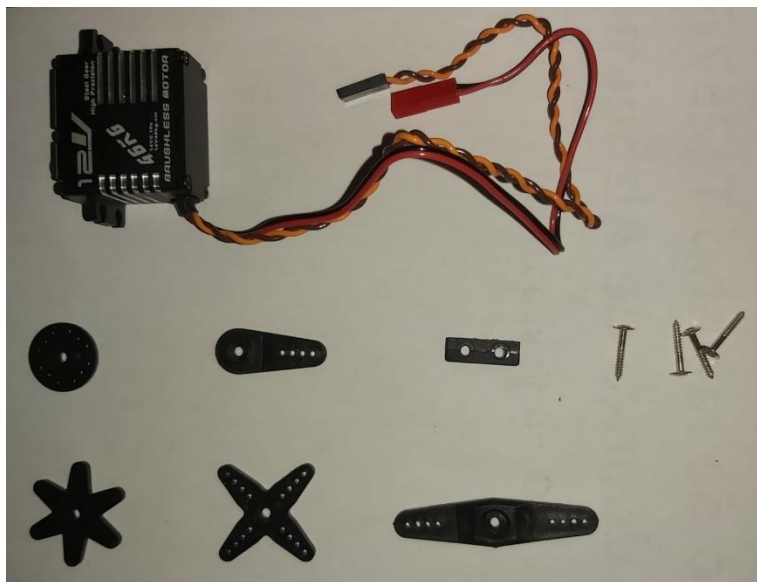


Figura 3.10 - Servo JX BLS-12V7146 e acessórios

A partir destes requisitos seleccionou-se a estrela de seis pontas pois cumpria com ambos os requisitos.

De seguida foram alteradas as dimensões do veio inicialmente projetado. Esta alteração ao projeto foi necessária por três razões: em primeiro lugar, sendo uma das hipóteses a construção do veio utilizando PLA, com o diâmetro inicial existente e utilizando esse material não garantiria a integridade estrutural do mesmo pelo que ao ser exercida força no mesmo pelo servo e a transmissão dessa força à barbatana que estaria sujeita à resistência da água poderia levar à rutura do mesmo; em segundo lugar, pelo facto da dimensão inicial não permitir o uso do conector selecionado; por fim, como o cilindro central já estava construído com as furações de 40mm as alterações teriam de ser ao nível do buçim e veio. Decidiu-se também reduzir de três zonas de o-rings para duas, utilizando na mesma um calculador de o-rings, para tentar diminuir o atrito gerado mantendo a estanqueidade e acrescentar dois escatéis que seriam responsáveis por transmitir a rotação do veio à barbatana. (Yin *et al.*, 2016) (Bandyopadhyay, Beal and Menozzi, 2008)

Para a construção e/ou aquisição do veio foram estudados 3 materiais diferentes: o aço inoxidável AISI 304, o alumínio 5083-H111 e o PLA.

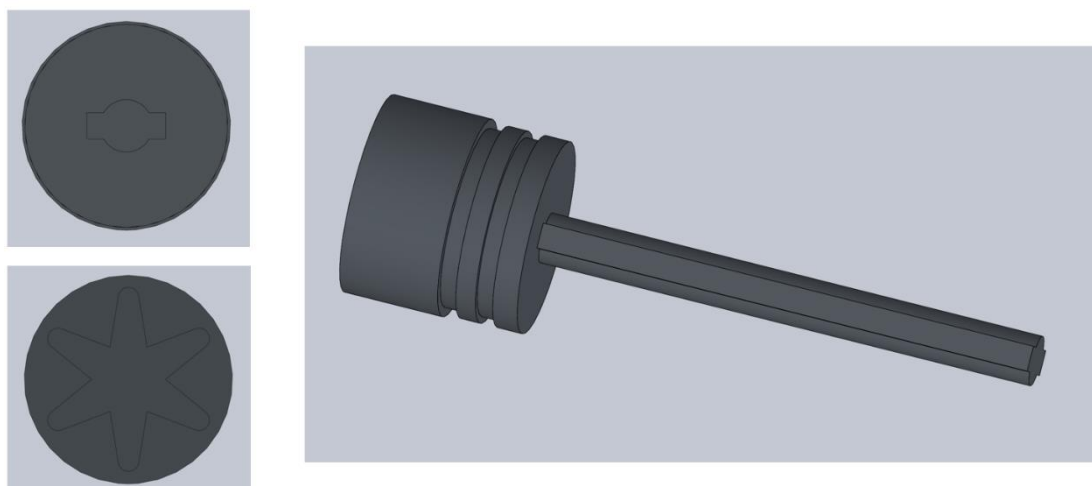


Figura 3.11 - Veio v1

Tabela 7 – Propriedades dos Materiais

Material	Aço AISI 304 ⁴	Aluminio 5083-H111 ⁵	PLA ⁶
Tensão de Fratura à Tração/ Tensile Strength [MPa]	517.017	300	68
Densidade/Density [g/cm ³]	8	2.7	1.24
Módulo de Elasticidade Transversal/Shear Modulus [GPa]	75	26	1.287
Tensão de cedência /Yield Strength [MPa]	206.807	150	85
Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young / Elastic Modulus or Young Modulus [MPa]	190000	68000	3200

⁴ Dados obtidos através da biblioteca de matérias do *SolidWorks*

⁵ Dados obtidos através do site (MakeltFrom, s.d.)

⁶ Dados obtidos através (Dremel Digilab, s.d.)

Foram escolhidos estes três materiais para estudo pelas suas características mecânicas e por todos eles já existirem no veículo. Assim era necessário cumprir três requisitos: baixo custo (requisito de todo o projeto), capacidade de resistir às forças de flexão e torção e baixa densidade por forma a interferir o menos possível com a flutuabilidade de todo o veículo.

Realizou-se o estudo das forças de flexão a que o veio estaria sujeito. Em primeiro lugar calculou-se a tensão de flexão máxima para cada material, σ , através das expressões (3) e (4) derivadas da teoria geral da viga de Euler-Bernoulli (Young and Budynas, 2002).

$$\sigma = \frac{M \times c}{I} \quad (3)$$

Em que:

σ - Tensão máxima à flexão [Pa]

m – Momento fletor aplicado [N.m]

c – Distância máxima ao eixo neutro [m]

I – Segundo momento de área da secção transversa [m^4]

$$M = F \times b \quad (4)$$

Em que:

F – Força de flexão máxima [N]

b – Braço [m]

Substituindo M na equação (3) vem:

$$F = \frac{\sigma \times I}{b \times c} \quad (5)$$

Em que se pretende calcular a força aplicada por forma a que o veio não atinga o regime plástico. Assim a tensão a considerar na equação (5) será a tensão de cedência, a tensão (σ) do material em estudo. Substituindo na expressão (5) os valores da Tabela 7 e valores retirados do *SolidWorks* obtém-se as forças para cada um dos materiais, 227N, 165N e 93,67N para o Aço, Alumínio e PLA respetivamente.

Para validar os resultados obtidos analiticamente utilizou-se o SolidWorks no qual se modelou o veio e posteriormente se analisaram as tensões de VonMises e a deformação em [mm] ao longo do veio com recurso ao método de elementos finitos do Add In Simulation do SolidWorks. Para esta análise foram definidos os seguintes parâmetros: fixo na zona de o-rings, força máxima calculada analiticamente aplicada na extremidade e malha fina (o SolidWorks não permite um controlo preciso da malha podendo-se apenas escolher num intervalo entre malha grossa e malha fina).

Analisando os resultados obtidos é possível verificar que se for exercida uma força de 93N num veio em PLA ele iria ceder (Apêndice A). Realizando algumas iterações foi possível obter a força máxima que o veio resistiria sem ceder seria abaixo de 78N (Figura A.7). Quanto aos outros dois materiais os valores teóricos vão ao encontro da simulação.

Finalizado este processo foram consultados alguns fornecedores para se obterem alguns orçamentos para o veio em aço e alumínio. Para facilitar a maquinação das peças e ter alternativas caso a peça original fosse demasiado cara pela sua ligação em estrela e pela redução de diâmetro foram feitas três adaptações diferentes (Figura 3.12).

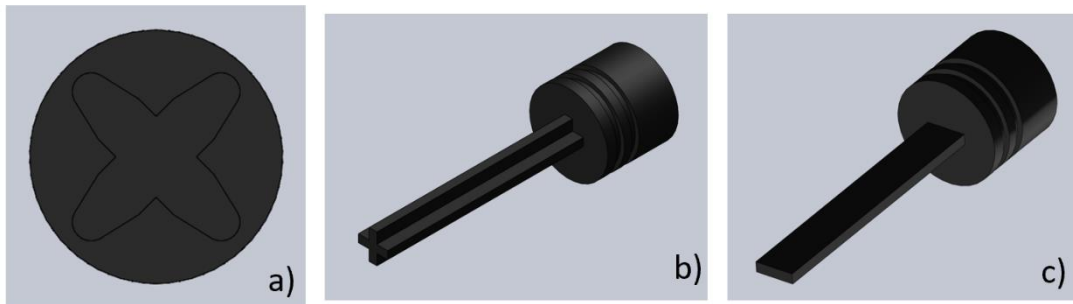


Figura 3.12 – Alternativas ao veio original. a) Ligação em estrela de quatro pontas; b) Veio em cruz; c) Veio reto.

Na primeira manteve-se o formato do veio, alterando a ligação de estrela de seis pontas para estrela de quatro pontas. Para ambas as ligações foram feitas duas alternativas ao veio original, um veio em cruz e um veio reto fazendo um total de seis veios diferentes. Estas alternativas seriam de maquinação mais simples numa tentativa de abranger um maior número de empresas, pensando em empresas que não utilizem CNC (*Computerized Numerical Control*) e utilizem métodos mais tradicionais e também de obter o menor preço possível mantendo a peça funcional.

Após a receção dos orçamentos verificou-se que se podia manter o veio original pelo facto da diferença de preços para as restantes iterações ser desprezável. Conforme a tabela abaixo é possível ver uma média do preço de maquinação para cada um dos materiais.

Tabela 8 – Orçamento de menor valor obtido para a manufatura de um veio.

Aço AISI 304	Alumínio	PLA
640€	388€	10,30€ ⁷

Tendo em conta a sua densidade e preço exclui-se o aço. Em relação ao alumínio e ao PLA, apesar do alumínio ser mais resistente, o PLA é economicamente mais viável, pelos fatores mencionados anteriormente.

Antes da produção da peça realizou-se o cálculo das forças máximas de sustentação e arrasto a que o veio estaria sujeito tendo em conta o seu perfil, para se saber se estas não seriam superiores à força de cedência. Para isto calculou-se o número de Reynolds, valor necessário para consultar os gráficos em Anexo III .

Para este estudo considerou-se uma temperatura de 15°C para a água do mar, a massa específica da água do mar $\rho_{mar} = 1026 \text{ Kg/m}^3$ e uma viscosidade dinâmica $\mu_{mar} = 0.00122 \text{ Pa.s}$.

$$Re = \frac{\rho_{mar} \times v \times D}{\mu_{mar}} \quad (6)$$

Sabendo que a velocidade máxima de projeto é $v = 1 \text{ m/s}$ e o comprimento máximo da corda $D = 0.225 \text{ mm}$ obtém-se um número de Reynolds $Re = 189200$ estando assim dentro dos valores do gráfico Anexo III .

⁷ Valor estimado tendo em conta gastos em eletricidade, material e desgaste da máquina.

Segundo Eftekhari and Mahdi Al-Obaidi, a maior força de sustentação e de arrasto correspondem a ângulos de ataque de 32º e 70º respetivamente, obtendo-se assim um coeficiente de sustentação $C_{Sustentação} = 0.63$ e $C_{Arrasto} = 0.76$. Por fim, sabendo a área projetada, $S[m^2]$ (obtida através do *SolidWorks*) obtém-se os valores da força de sustentação $F_{Sustentação} = 18.29$ N e arrasto $F_{Arrasto} = 22.06$ N.

$$F_{Sustentação} = \frac{1}{2} \times \rho_{mar} \times C_{Sustentação} \times v^2 \times S \quad (7)$$

$$F_{Arrasto} = \frac{1}{2} \times \rho_{mar} \times C_{Arrasto} \times v^2 \times S \quad (8)$$

Para este estudo considerou-se que ambas as forças máximas aconteciam em simultâneo, que apesar não acontecer na realidade, serve para um estudo mais conservador que visa garantir a resistência do material uma vez que não foi utilizado nenhum fator de projeto face à necessidade de controlo de massa final estimada para o veículo e baixos níveis esperados de carregamento dinâmico.

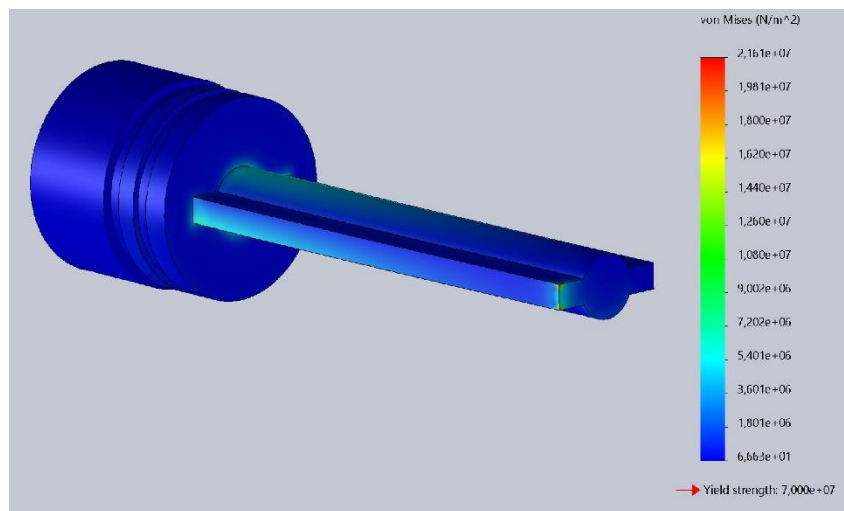


Figura 3.13 – Tensão de VonMises ao longo do veio quando aplicadas as forças de arrasto e sustentação.

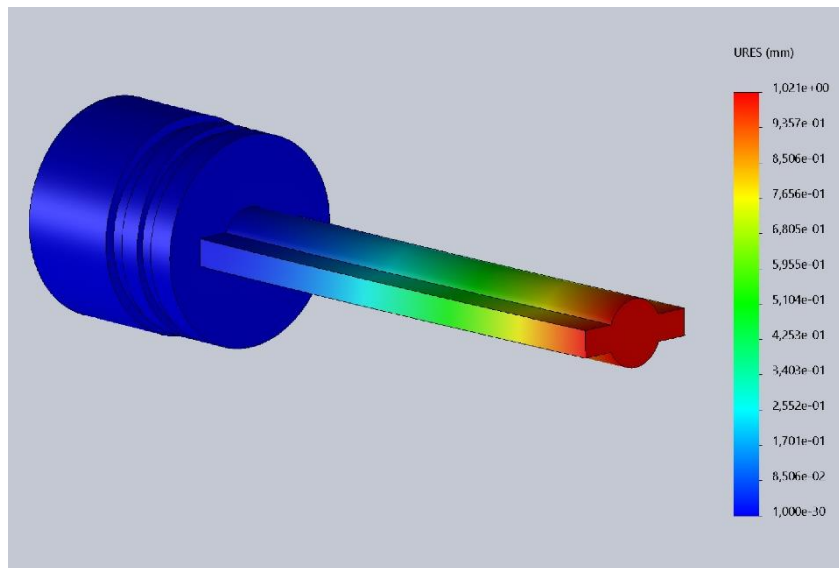


Figura 3.13 – Deformação em mm quando aplicadas as forças de arrasto e sustentação.

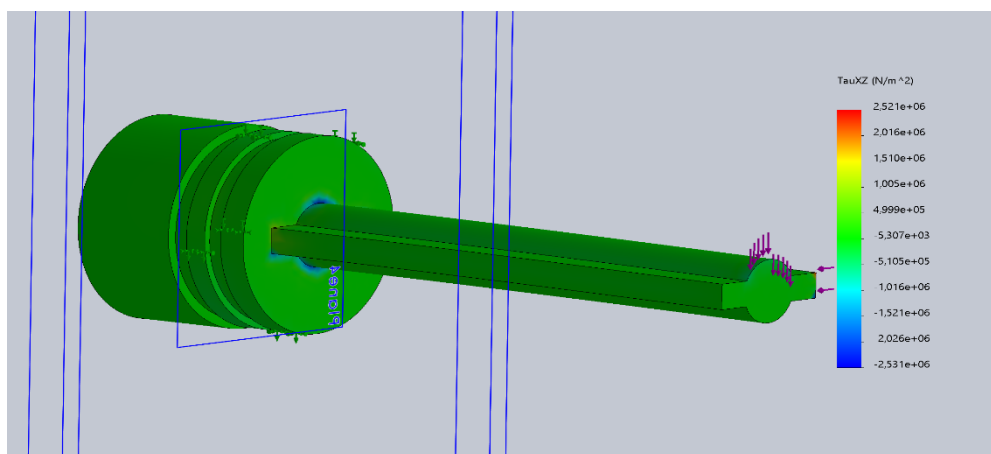


Figura 3.14 – Tensão de corte quando aplicadas as forças de arrasto e sustentação.

Verificou-se que no pior cenário, as maiores forças aplicadas nos extremos e em simultâneo, o veio não apresenta tensões consideráveis e teria apenas uma deformação máxima de 1 mm e uma tensão de VonMises máxima na ordem dos 14.4MPa. Isto era expetável visto que a resultante destas forças é bastante inferior aos 78N.

Relativamente às tensões de torção, considerando que o eixo de rotação da barbatana se encontra alinhado com o ponto de aplicação da força de sustentação não é expectável que produza um binário de torção significativo.

Da análise de elementos finitos com o carregamento efetuado verifica-se que os níveis de tensão de corte têm um valor máximo de 1.5MPa na zona de transição de menor diâmetro para maior diâmetro, sendo que, pelo Critério de Tresca, equação (9), a máxima tensão de corte (τ_y) é 49MPa pelo que existe uma margem de segurança de 32.7 não sendo assim expectável qualquer tipo de falha por carregamento ao corte.

$$\tau_y = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

4. Aspectos de produção e construção

“Experience without theory is blind, but theory without experience is mere intellectual play.”

Emmanuel Kant

Neste capítulo serão abordadas todas as partes de construção, os problemas encontrados e soluções desenvolvidas.

4.1. Barbatana Caudal

Durante a fase de projeto desenvolvida anteriormente a este trabalho a estrutura da barbatana caudal foi projetada e construída (Figura 2.24). Contudo ficou em falta a construção da parte exterior da barbatana.

Para a cobertura foi projetado inicialmente a utilização de uma borracha Ecoflex 00-30, que são silicones catalisados por platina, misturados numa proporção de volume ou peso de 1:1, com um tempo de cura de 4 horas à temperatura ambiente, seguido de uma cura de 2 horas a 80°C e finalmente de 1 hora a 100°C (Paiva, 2020). Contudo este material tinha dois problemas: exigia um forno específico pois, apesar de um forno convencional conseguir atingir estas temperaturas não teria as dimensões necessárias nem forneceria calor uniformemente para garantir a cura do material de forma adequada e em segundo lugar o PLA, material do molde, não deve ser exposto a temperaturas superiores a 60°C. Assim, decidiu-se utilizar o mesmo material utilizado na barbatana dorsal o Ecoflex 00-35. À semelhança do 00-30, este é um silicone catalisado por platina, misturado na proporção de 1A:1B volume ou peso, no entanto tem a mais-valia de não precisar de temperaturas altas para curar podendo ser curado à temperatura ambiente demorando aproximadamente cinco minutos.

Apesar de já estar projetada, a sua forma não tinha em consideração a colocação de uma barbatana caudal modular tendo assim sido feita essa alteração na parte posterior do molde. Essa peça seria construída em PLA, na sua parte interior teria uma

ligação semelhante à utilizada entre as bases dos servos e as placas. Na parte exterior faria ligação ao suporte da barbatana, peça que teria a função de tornar esta zona do veículo estanque para isso comprimindo o silicone através da união com três parafusos M4 (Figura 4.1) e ligar a estrutura da cauda à barbatana caudal.

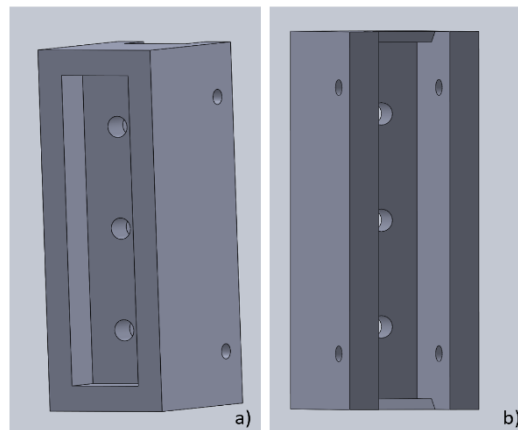


Figura 4.1 - Suporte da cauda. a) Parte interior; b) Parte onde se irá ligar a barbatana caudal.

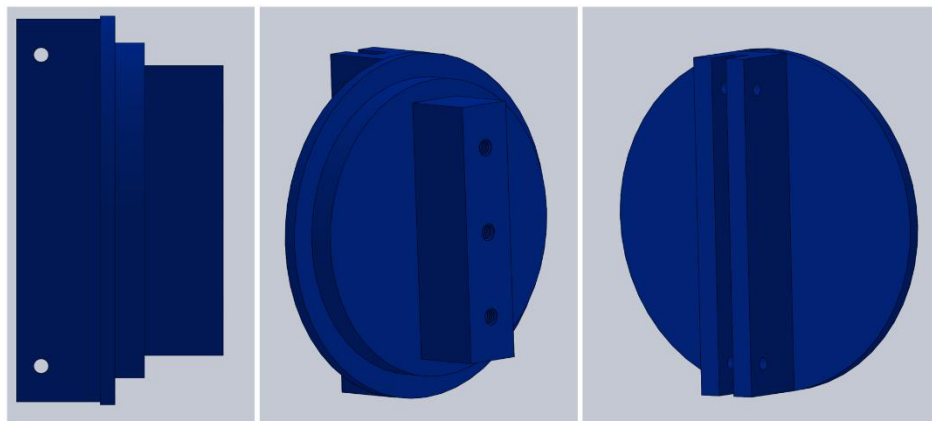


Figura 4.2 - Conector da placa à barbatana caudal.

Para produzir a cobertura em silicone foi necessário criar um molde exterior e um molde interior. No projeto e construção destes moldes foram criados sulcos

correspondentes aos locais das costelas para melhorar o suporte e criar pontos de ligação entre a cobertura em silicone e a estrutura da cauda do veículo.

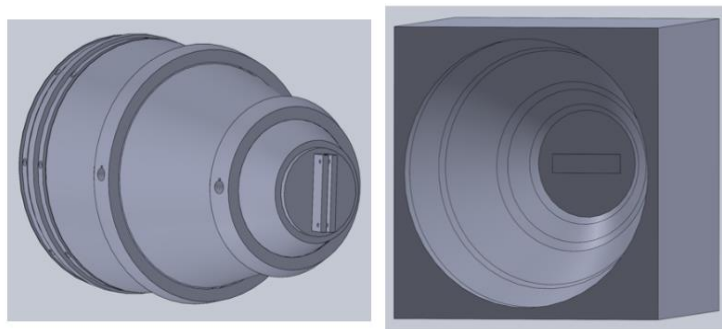


Figura 4.3 – Molde Interior (Esquerda) e Molde Exterior (Direita).

Para a construção do molde havia duas opções, imprimir ambos os moldes utilizando a impressora 3-D ou imprimir o molde interior e fazer o exterior utilizando argila. A primeira opção garantia um molde teoricamente perfeito, contudo tem o problema de demorar bastante tempo pelas grandes dimensões das peças em comparação com as dimensões da zona de impressão o que tornava necessária a divisão deste molde em várias partes mais pequenas. A segunda, é um método mais económico e rápido, contudo mais exigente a nível técnico e não tão preciso. Independentemente da alternativa escolhida o primeiro passo era obviamente a impressão do molde interior. Para o molde interior optou-se pela opção mais rápida e menos dispendiosa, pelo facto de se tratar de um protótipo e nesta fase inicial a precisão não ser um requisito prioritário. Para definir a espessura desejada para a cobertura em silicone, foi utilizado cordel com 5mm de espessura enrolado duas vezes em todo o molde interior fazendo uma espessura de camada de 10mm. Para o molde exterior revestiu-se a combinação do molde interior com argila e deixou-se secar.



Figura 4.4 – Construção do molde exterior utilizando argila

Apesar das suas vantagens não foi possível obter um molde exterior funcional pois a argila fraturou em várias zonas diferentes não sendo assim garantida a estanqueidade do molde. Posto isto, avançou-se para o segundo método, a impressão do molde exterior.



Figura 4.5 – Moldes exterior e interior impressos em PLA.



Figura 4.6 – Várias etapas no processo de produção da cobertura.

Este método permitiu assim obter a cobertura em silicone para utilizar no veículo.

4.2. Veios das Barbatanas Peitorais

Após os estudos realizados no capítulo anterior, foi realizada uma alteração na dimensão da zona de o-rings pelo facto de os o-rings encontrados no mercado serem de 1.78mm de espessura em vez dos 3.53mm projetados. Concluídas as alterações procedeu-se a impressão do veio.



Figura 4.7 – Primeiro veio construído.

Concluída a construção, colocaram-se os o-rings e ao montar no bucim verificou-se que o diâmetro era demasiado grande. Diminui-se o diâmetro para 37.75mm e procedeu-se novamente à montagem tendo sido bem-sucedida. De seguida foram efetuados testes à vedação entre o bucim e o veio. Apesar da alteração feita inicialmente à zona de vedação dos o-rings utilizando as informações fornecidas por um “O-ring Calculator” o teste foi falhado deixando passar água. Para resolver este problema foram efetuadas diversas iterações a partir das dimensões iniciais no sentido de encontrar as dimensões certas para a zona de o-rings e atingir-se a estanqueidade.



Figura 4.8 – Algumas das tentativas até obter um veio com resultados positivos ao teste de estanqueidade.

4.3. Cobertura frontal

Para a cobertura frontal do veículo foi adquirido um domo com a forma semelhante à projetada tendo as seguintes dimensões: 7” ou 17.78 cm de diâmetro, altura de 3” ou 7.62 cm, ¼” ou 0.635cm de espessura e uma flange de ½ ” ou 1.27cm.

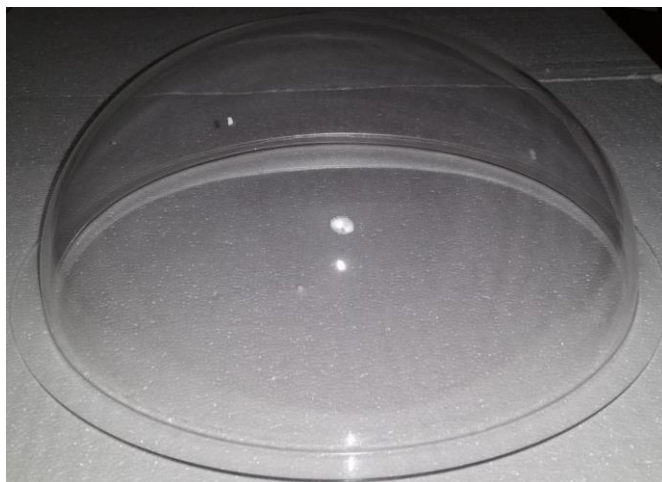


Figura 4.9 – Exemplo de um domo em acrílico.

Fonte: Retirado de Amazon

Como o domo adquirido não tinha as furações para a fixação ao veículo feitas de origem recorreu-se à oficina da Escola Naval para se fazerem 8 furações de 4mm. Como não se encontrou no mercado um vedante com as dimensões do domo utilizou-se parte de uma câmara de ar à volta da flange. Esta técnica de vedação teve de ser feita várias vezes até se obter um resultado que fosse satisfatório nos testes de estanqueidade.



Figura 4.10 – Parte frontal montada e estanque.

4.4. Base dos sensores

A base dos sensores é o local onde serão colocados os sensores de pressão e a eco sonda sendo também o local de saída dos tubos do sistema de flutuabilidade. Ambos os suportes dos sensores foram projetados com o intuito de evitar a passagem de água do exterior para o interior do veículo.

Quanto à passagem dos tubos, pelo facto de terem de fazer um ângulo de 90º logo após a entrada dificulta a introdução de qualquer tipo de elemento que garanta a estanqueidade desta zona. Apesar de já existir um par de tubos adquiridos estes eram demasiado frágeis e quebravam logo à entrada estrangulando o fluxo de água. Aproveitou-se assim a necessidade de substituir estes tubos por uns de diâmetro maior que ficassem à face e assim impedissem a passagem de água para o interior. Contudo isto não foi possível visto não terem sido encontrados no mercado tubos com o diâmetro necessário tendo sido adquirido o maior possível. Posto isto, mantinha-se o problema inicial. Após consultar alguns fornecedores de borrachas, retentores e vedantes surgiram três opções: fazer uma peça à medida para a base de sensores existente, mas que pela sua forma não garantia a estanqueidade e sairia mais cara, adaptar uma tampa de borracha ou uma peça semelhante (Figura 4.11) ou modificar as furações. Optou-se pela segunda opção sendo a mais economicamente viável e mais conservadora.



Figura 4.11 A imagem à esquerda corresponde à peça que se pretendia adquirir. A imagem da direita corresponde à peça

Para a sua montagem no veículo recorreu-se novamente à oficina da EN tendo esta sido encaixada à pressão na base garantindo assim o isolamento desta zona.



Figura 4.12 – Base dos sensores com sensores e tubos.

5. Testes

Uma parte fundamental em qualquer trabalho de projeto e construção é a fase de testes onde se colocam à prova os componentes e sistemas construídos por forma a garantir que estão prontos a desempenhar as suas funções. Nesta fase serão demonstrados testes práticos e algumas simulações realizadas a alguns componentes do veículo.

5.1. Testes aos veios

Nos capítulos anteriores foram projetados e construídos os veios e os bucins sendo uma das preocupações latentes o facto do atrito entre o veio e o bucim ser tão alto que o servo não tivesse capacidade de o rodar.

Para isto foi instalado o servo com a respetiva ligação ao veio. De seguida programou-se o Arduino utilizando um código exemplo “Servo Sweep” adaptado às necessidades, tendo este a função de apenas girar o servo de 30º a 140º e depois de 140º a 30º. Para fornecer a energia necessária utilizou-se uma fonte de alimentação DC (PS3005 DC Power Supply 0-30V 0-5A) ligando-a ao regulador de tensão (DROK Mini Electric Voltage Converter 15A Module) que por sua vez se ligou ao servo.

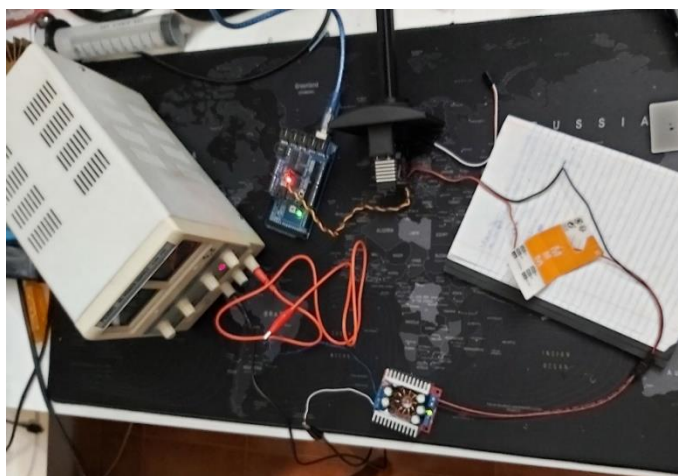


Figura 5.1 – Montagem de todo o sistema.

Apesar de se notar alguma resistência, o servo conseguiu rodar o veio. Contudo é uma preocupação constante pelo esforço que o servo tem que fazer para conseguir rodar o veio levando-o mesmo a aquecer rapidamente sendo assim algo a melhorar no desenvolvimento de posteriores versões do veio e/ou buçim.

5.2. Testes estanqueidade

A estanqueidade é a primeira prioridade em qualquer veículo de subsuperfície. Assim sendo foram efetuados testes de estanqueidade a várias partes do veículo isoladas por forma a que quando se montassem e se efetuasse o teste geral, essas peças não representariam um possível ponto de entrada de água.

5.2.1. Cobertura Frontal

A primeira peça a ser testada foi a cobertura frontal. Apesar de ter um isolamento relativamente simples, o facto de não possuir um vedante feito à medida tendo sido utilizada partes de uma camara de ar de bicicleta revelou-se desafiante. Para efetuar o teste utilizou-se uma bacia com água e submergiu-se a peça até a linha de água ficar ligeiramente abaixo do topo da peça.

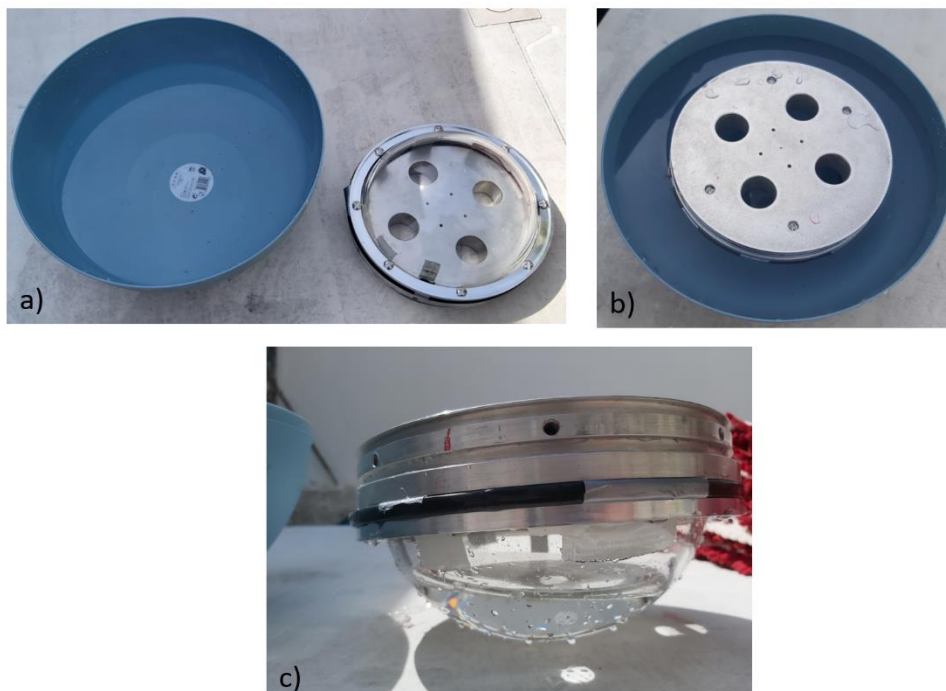


Figura 5.2 Metodologia e resultados obtidos. a) Material utilizado; b) Teste em curso; c) Teste falhado.

Um dos requisitos do veículo é uma autonomia de duas horas debaixo de água. Assim sendo os testes realizados tinham como meta final as três horas sem ocorrer a passagem de água. Na Figura 5.2 c) é possível ver o resultado ao fim de dez minutos do primeiro teste realizado. Para resolver este problema foram realizadas várias tentativas, aumentando/diminuindo a quantidade de voltas de borracha que se davam em torno no domo. A versão final possui duas voltas com aproximadamente 7cm de largura presas com fita-cola (Figura 4.10) e aguentou aproximadamente cinco horas, intervalo tempo findo o qual se deu o teste por concluído.

5.2.2. Barbatana Dorsal

Para a barbatana dorsal a metodologia utilizada foi a mesma. Submergiu-se até a linha de água ficar á face da parte superior sem entrar para o interior. Este teste foi bem-sucedido à primeira tentativa.



Figura 5.3 – Teste de estanqueidade realizado à barbatana dorsal.

5.2.3. Veio da Barbatana Peitoral

Durante a fase de projeto foram em simultâneo efetuados vários testes aos diversos veios construídos para garantir a estanqueidade dos mesmos. Para a realização dos testes utilizou-se um bucim alterado (Figura 5.4) e o veio que se pretendia testar. Este bucim permite a colocação de água no exterior muito semelhante a uma situação

real. O objetivo era que a água não passasse para o interior durante um período de três horas. Findo este período caso o interior do bucim não tivesse água dava-se o teste como bem-sucedido e o veio apto.



Figura 5.4 - Teste realizado aos veios. a) Bucim alterado e veio; b) O veio é inserido no bucim que é posteriormente cheio de água; c) Exemplo de um teste falhado; d) Exemplo de um teste bem-sucedido.

A Figura 5.4 c) é um exemplo de um teste falhado em que a principal causa deve-se a folgas entre o veio e o orifício onde se encontra. Para resolver este problema iterou-se várias vezes o veio fazendo alterações a essa zona para o tornar estanque.

5.2.4. Geral

Todos os testes realizados culminaram no teste de estanqueidade geral. Para a realização deste teste foram montados o cilindro central, a base dos sensores e respetivos sensores, a pega do cilindro central, os discos estruturais AV e AR, a

barbatana dorsal, a cobertura frontal, a cauda com as costelas e suportes dos servos, os buçins e os veios.



Figura 5.5 – Veículo montado para efetuar o teste de estanqueidade

Este teste tinha como objetivo principal verificar a estanqueidade geral do veículo como um todo e identificar pontos de entrada de água em locais não testados anteriormente, por exemplo, a união da cauda com o corpo ou o ponto de contacto entre o buçim da barbatana peitoral e o corpo. Como objetivo secundário tinha a verificação da estabilidade do veículo e o seu comportamento na água. O teste foi feito numa piscina com 1.5m profundidade e a temperatura do ar ambiente eram 35°C.

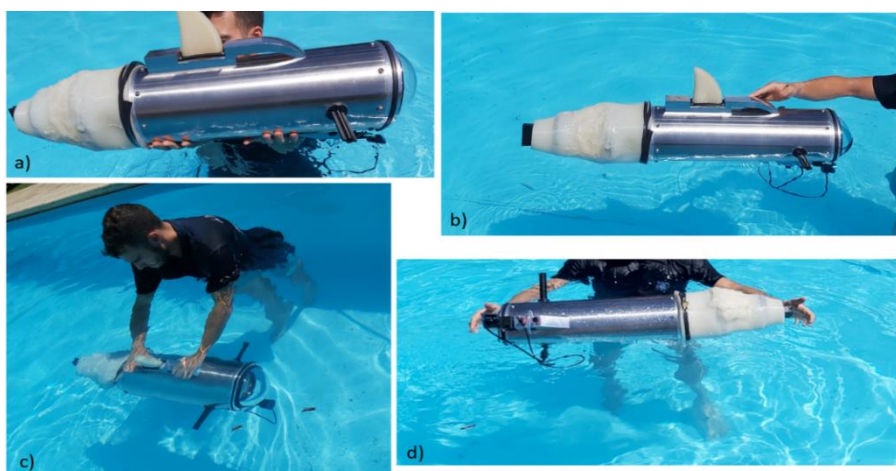


Figura 5.6 – Teste de estanqueidade geral. a) Colocação do veículo na água; b) Veículo a pairar apenas com apoio para não rodar; c) Veículo submerso através de forças externas; d) Veículo a pairar sem apoio.

Sendo este o primeiro teste geral de estanqueidade efetuado era expetável que o veículo não fosse completamente estanque e por isso houvesse pontos de entrada de água a resolver. O único ponto de entrada de água observado foi na ligação cauda-corpo sendo as restantes partes aparentemente estanques, mas isto só poderá ser confirmado após a resolução deste problema. Verifica-se que o veículo tem adornamento ou ângulo de banda a bombordo (Figura 5.6 b) e d)), tem um caimento de aproximadamente 2cm a vante e tem uma imersão média de 12 cm.

Para resolver o problema do adornamento/ângulo de banda terá de se verificar a posição transversal e vertical estimada do centro de gravidade e a sua posição real atual. Relativamente à imersão, também terá de se verificar a imersão projetada e respetivos volumes imersos/emerso face à imersão real. Após estas duas verificações e não havendo mais equipamento a embarcar, terá de se colocar lastro de forma a corrigir a atitude do veículo e a garantir que o sistema de lastro tem capacidade para corrigir o caimento e efetuar a imersão total do veículo. Relativamente ao objetivo principal do teste, a verificação de estanqueidade, este foi bem-sucedido.

No final da realização do teste surgiu outro problema inesperado e que advém das condições atmosféricas, toda a estrutura da cauda em PLA deformou-se devido ao calor (Figura 5.7).



Figura 5.7 - Estrutura da cauda após o teste.

Devido à temperatura ambiente e pelo facto de toda a estrutura estar envolvida pela manga de silicone aqueceu a uma temperatura superior a 55°C, temperatura à qual o PLA começa a perder características e a deformar-se.

5.3. Teste ao sistema de propulsão

Por forma a garantir que o sistema de propulsão estava pronto do ponto de vista estrutural e mecânico foram efetuados testes ao mesmo. Para isto foi colocado um servo no suporte posterior e efetuou-se a ligação entre o mesmo e a costela posterior através de dois arames. Para gerar movimento utilizou-se o mesmo programa utilizado para o teste ao veio da barbatana peitoral com alterações aos ângulos de giração. Este programa tinha definida uma amplitude de movimento de 60° e uma frequência de 8Hz.

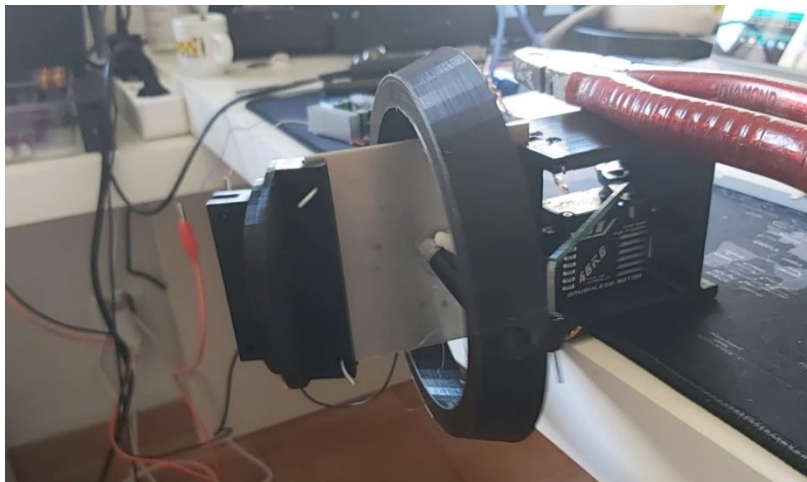


Figura 5.8 – Teste efetuado ao sistema de propulsão.

Do ponto de vista mecânico não houve problemas a reportar estando assim o sistema propulsor pronto a ser programado.

6. Lições Aprendidas e Trabalho Futuro

“Learn from others’ mistakes. You could not live long enough to make them all yourself.”

US Navy Admiral Hyman G. Rickover

6.1. Lições Aprendidas

Durante o projeto, produção e construção do veículo surgiram vários problemas que tornaram este trabalho não num sprint, onde da partida já se vê a meta numa simples linha reta, mas num rally onde existem vários fatores impossíveis de controlar. Assim para evitar a repetição dos erros já cometidos, serão enumerados e explicados os principais problemas, dificuldades e contratempos encontrados.

Uma das grandes dificuldades encontradas foi durante a fase de projeto, as peças dimensionadas funcionarem no software *SolidWorks* ligando entre si sem aparentes problemas, mas quando produzidas serem incompatíveis tendo de ser trabalhadas com recurso a uma lixa ou tendo mesmo de ser reconstruídas. Isto leva a um aumento significativo do tempo necessário até se obter uma peça viável.

Outro contratempo que surgiu foi a necessidade de investir algum tempo na aprendizagem de produção de peças com recurso a uma impressora 3D. Algo que inicialmente parecia simples, e por isso desconsiderado, tornou-se um problema pela necessidade de obter um elevado volume de peças com diferentes acabamentos e resistências. Esta é sem dúvida uma tecnologia extraordinária pois permite a produção de peças complexas, com vários detalhes e diversos níveis de resistências a um preço bastante acessível. No entanto, para que isso aconteça exige ao utilizador um certo nível de conhecimento de forma a manipular os parâmetros de impressão da maneira correta.

Tal como relatado no Capítulo 5, a estrutura em PLA da barbatana caudal deformou-se devido à exposição ao calor. Para um protótipo inicial o PLA é um bom material pois é relativamente fácil de trabalhar, é resistente o suficiente para testes à

instalação propulsora e barato. Contudo, para um veículo final sugere-se a alteração desta estrutura para ABS que é um material mais resistente física e termicamente que o PLA tendo uma temperatura útil de 98°C ou substituir por ASA (Acrylic Styrene Acrylonitrile) que tem propriedades semelhantes ao ABS mas tem maior resistência à radiação UV.

Durante a fase de projeto e construção do veio, foi dimensionada a zona de o-rings com recurso a um *O-ring calculator*. Contudo este calculador não tinha como parâmetro de entrada o material onde o O-ring seria colocado, PLA. Assim quando se fez o teste de estanqueidade ao veio este deixava passar água levando a que tivessem de ser alteradas as dimensões da zona de o-rings. Esta alteração levou a um ciclo vicioso, quando se aumenta o nível de estanqueidade aumenta também o atrito e aumenta a força que o servo tem de fornecer levando-o a sobreaquecer e a não se comportar como expetável. Para quebrar este ciclo foram feitas dezenas de versões do veio, contudo na entrega da presente dissertação ainda não se obteve um veio funcional. Assim sugere-se, para uma iteração futura do veio, a alteração para alumínio por forma a reduzir o atrito, garantir a estanqueidade e mobilidade.

Um percalço que também surgiu durante este trabalho mas que já havia sido referido anteriormente pelo GMAR EN-MEC Dias de Paiva, passo a citar: “Outro entrave que surgiu, foi a dificuldade em arranjar peças ou material no mercado com as dimensões ou forma desejadas, ou serviços com capacidade de maquinar os mesmos.”(Paiva, 2020), fim de citação.

O último problema encontrado foi a utilização do silicone Ecoflex para a barbatana caudal. Apesar de ser o material adequado o seu manuseamento mostrou-se mais complexo do que esperado pelo facto de curar num espaço de tempo tão curto e durante esse período haver uma constante mudança na sua consistência. Outra consequência negativa dessa rápida mudança de consistência é a quantidade de material que fica no recipiente de mistura levando à necessidade de utilização de mais silicone do que calculado inicialmente. Para a produção de futuras barbatanas caudais ou moldes semelhantes sugere-se fazer por etapas, pois permite que o silicone seque

uniformemente sendo de mais fácil manuseamento no sentido em que a área de trabalho é menor. Outra recomendação é a utilização de água ou outro fluido semelhante para ter uma melhor noção do volume de produto necessário contando sempre com os vários desperdícios que ficam depositados no recipiente de mistura e nas próprias embalagens.

6.2. Trabalho Futuro

Como trabalhos futuros recomendam-se alguns estudos ao nível da plataforma e testes a efetuar para garantir o funcionamento e a otimização do veículo.

Ao nível da plataforma o veículo carece de uma otimização de todas as suas barbatanas (caudal, peitorais e dorsal) pois têm um grande impacto na manobrabilidade, velocidade e até na autonomia do veículo. Assim sugere-se um estudo detalhado de cada uma das barbatanas tendo em consideração a sua forma e material de construção recorrendo a uma Análise de Fluidos Computacional (Computational Fluids Dynamics CFD) através do *SolidWorks Flow Simulation* ou, preferencialmente, do *Ansys CFX* pois este permite o ajuste de todos os parâmetros de fronteira. Posteriormente sugere-se a validação dos resultados obtidos através da realização de testes num tanque de ensaios hidrodinâmicos, um túnel de vento ou num laboratório adaptado para o efeito. O veículo beneficiaria de um estudo da forma do seu corpo no sentido de procurar uma alternativa que fosse mais hidrodinâmica mantendo o número de componentes existentes. Ainda ao nível da plataforma sugere-se um estudo do arranjo interno de todos os componentes mecânicos e eletrónicos bem como um estudo da estabilidade do veículo por forma a corrigir os problemas identificados no Capítulo 5.

Quanto aos testes, é imperativo realizar mais testes de estanqueidade gerais para garantir que a plataforma está apta à colocação dos componentes eletrónicos e assim avançar para os testes seguintes. Em simultâneo deve também ser feito um teste aos tanques de flutuabilidade para garantir o correto funcionamento deste sistema antes de ser inserido no veículo. Após ambos os testes anteriores serem concluídos com sucesso deve-se efetuar um teste de flutuabilidade do veículo com o objetivo de verificar

a capacidade de variação da profundidade do mesmo e verificar a velocidade de variação destas alterações. Para verificar a capacidade de locomoção do veículo deve efetuar -se um teste de mobilidade. Por fim deve fazer-se um teste misto onde se combinam os testes anteriores com o objetivo de obter um veículo operacional.

Conclusão

Num trabalho deste género ainda mais importante que o resultado final, a obtenção de um veículo autónomo biomimético operacional, é todo o trabalho, problemas e soluções que surgiram durante todo o processo de projeto e construção.

Os objetivos propostos foram parcialmente concluídos. Foi realizado o projeto e construção do veio, bucim e barbatana, elementos previamente projetados, mas que necessitaram de ser alterados. Durante esta fase foram realizados estudos às forças que estariam presentes por forma a garantir que o veio seria capaz de as suportar sem danos. Seguiu-se a fase de construção, onde foram montadas todas as peças obtidas até à data. Nesta fase foram necessárias realizar várias iterações do veio da barbatana peitoral até obter um veio capaz de cumprir a sua função. Em paralelo com esta fase foram realizados testes que serviam para aprovação dos componentes.

Relativamente aos objetivos propostos ficou por realizar o projeto e aplicação do arranjo interno. Isto deveu-se a vários contratempos que surgiram durante a fase de construção o que levou à necessidade de investir mais tempo em certos detalhes, como por exemplo, o aprofundamento do conhecimento da impressão 3D, o isolamento da cobertura frontal, a construção da cobertura da barbatana caudal, etc...

A natureza da dissertação implica abordar múltiplas áreas: engenharia de materiais, técnicas de vedação, arquitetura naval, impressão 3D, eletrónica e programação, o que torna o projeto bastante complexo e desafiante levando talvez à necessidade de cooperação com entidades especializadas em determinadas áreas para se poder avançar mais rápido.

Bibliografia

Airfoil Tools (2021). Available at: <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>.

Araújo, H. F. R. (2020) 'Hilário Filipe Rocha Araújo Projeto e desenvolvimento de um veículo autónomo biomimético de subsuperfície'.

AUVAC (2000). Available at: <https://auvac.org/156-2/>.

Bachmayer, R. *et al.* (2004) 'Underwater gliders: Recent developments and future applications', *2004 International Symposium on Underwater Technology, UT'04 - Proceedings*, pp. 195–200. doi: 10.1109/ut.2004.1405540.

Bandyopadhyay, P. R., Beal, D. N. and Menozzi, A. (2008) 'Biorobotic insights into how animals swim', *Journal of Experimental Biology*, 211(2), pp. 206–214. doi: 10.1242/jeb.012161.

Bellingham, J. G. *et al.* (2010) 'Efficient propulsion for the Tethys long-range autonomous underwater vehicle', *2010 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles, AUV 2010*. doi: 10.1109/AUV.2010.5779645.

Blidberg, D. R. (2001) 'The development of autonomous underwater vehicles (auvs); a brief summary'. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.122.1739&rep=rep1&type=pdf%5Cnpapers2://publication/uuid/04E2D694-AC73-4625-A5D4-569005FB524D>.

Carlton, J. (2007) *Marine Propellers and Propulsion*.

Colgate, J. E. and Lynch, K. M. (2004) 'Mechanics and control of swimming: A review', *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29(3), pp. 660–673. doi: 10.1109/JOE.2004.833208.

Du, Ruxu; Li, Zheng; Youcef-Toumi, Kamal; Valdivia y Alvarado, P. (2015) *Robot Fish Bio-inspired Fishlike Underwater Robots*.

EDA Expands Swarming Biomimetic UUV Development Program (2019). Available at: <https://www.navalnews.com/naval-news/2019/10/eda-expands-swarming-biomimetic-uuv-development-program/>.

Eftekhari, S. and Mahdi Al-Obaidi, A. S. (2019) 'Investigation of a NACA0012 finite wing aerodynamics at low Reynold's numbers and 0° to 90° angle of attack', *Journal of Aerospace Technology and Management*, 11, pp. 1–11. doi: 10.5028/jatm.v11.1023.

Engineering Pacific Marine Environmental Laboratoy (2021). Available at: <https://www.pmel.noaa.gov/edd/slocum-sub-surface-electric-gliders> (Accessed: 1 May 2021).

Fletcher, B. (2000) 'UUV Master Plan: a vision for navy UUV development', in *Oceans Conference Record (IEEE)*. IEEE, pp. 65–71. doi: 10.1109/oceans.2000.881235.

Habib, M. K. and Paulo Davim, J. (2013) *Engineering creative design in robotics and mechatronics, Engineering Creative Design in Robotics and Mechatronics*. doi: 10.4018/978-1-4666-4225-6.

Hern, W. (2015) 'BR3 : a biologically inspired fish-like robot actuated by SMA-based artificial muscles .'.

Hobson, B. W. *et al.* (2012) 'Tethys-class long range AUVs-extending the endurance of propeller-driven cruising AUVs from days to weeks', *2012 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles, AUV 2012*. doi: 10.1109/AUV.2012.6380735.

Instituto Português do Mar e da Atmosfera (2021). Available at: <https://www.ipma.pt/resources.www/docs/publicacoes.site/pescado/site/introducao/peixes.htm>.

Kongsberg (2021). Available at: https://www.kongsberg.com/globalassets/maritime/km-products/documents/seaglider_product_specification.pdf.

Madureira, L. *et al.* (2013) 'The light autonomous underwater vehicle: Evolutions and networking', *OCEANS 2013 MTS/IEEE Bergen: The Challenges of the Northern Dimension*, pp. 1–6. doi: 10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608189.

Man, S. G. K. *et al.* (2012) 'Bio-inspired aquatic flight propulsion system for agile and manoeuvrable underwater vehicles', *Program Book - OCEANS 2012 MTS/IEEE Yeosu: The Living Ocean and Coast - Diversity of Resources and Sustainable Activities*, (May). doi: 10.1109/OCEANS-Yeosu.2012.6263515.

Mazlan, A. N. A. (2015) 'A Fully Actuated Tail Propulsion System for a Biomimetic Autonomous Underwater Vehicle', (January).

Monterey Bay Aquarium Research Institute - Annual Report (2019).

NASA (2021). Available at: <https://history.nasa.gov/naca/overview.html>.

NavalNews (2021). Available at: <https://www.navalnews.com/naval-news/2020/07/polands-mod-procures-additional-gavia-auvs/>.

Paiva, J. G. D. de (2020) 'Gonçalo João Dias de Paiva Desenvolvimento de um Veículo Autónomo Biomimético'.

Porez, M., Boyer, F. and Ijspeert, A. J. (2014) 'Improved Lighthill fish swimming model for bio-inspired robots: Modeling, computational aspects and experimental comparisons', *The International Journal of Robotics Research*, 33(10), pp. 1322–1341. doi: 10.1177/0278364914525811.

Prescott, T. J. *et al.* (2012) *Biomimetic and Biohybrid Systems, First International Conference, Living Machines 2012 Proceedings. Lectures Notes in Artificial Intelligence, Subseries of Lecture Notes in Computer Science*. Edited by T. J. Prescott *et al.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Lecture Notes in Computer Science). doi: 10.1007/978-3-642-31525-1.

Przybylski, M. (2019) 'Mathematical model of biomimetic underwater vehicle',

Proceedings - European Council for Modelling and Simulation, ECMS, 33(1), pp. 343–347.
doi: 10.7148/2019-0343.

Raj, A. and Thakur, A. (2016a) 'Fish-inspired robots: design, sensing, actuation, and autonomy—a review of research', *Bioinspiration & Biomimetics*, 11(3), p. 031001.
doi: 10.1088/1748-3190/11/3/031001.

Raj, A. and Thakur, A. (2016b) 'Fish-inspired robots: design, sensing, actuation, and autonomy - a review of research', *Bioinspiration and Biomimetics*. doi: 10.1088/1748-3190/11/3/031001.

Research Technical Proposal - SABUVIS II (2018) *Research Technical Proposal - SABUVIS II*.

Salazar, R. *et al.* (2019) 'A review on the modeling, materials, and actuators of aquatic unmanned vehicles', *Ocean Engineering*, 172(November 2018), pp. 257–285.
doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.11.047.

Serchi, F. G., Arienti, A. and Laschi, C. (2013) 'Biomimetic vortex propulsion: Toward the new paradigm of soft unmanned underwater vehicles', *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(2), pp. 484–493. doi: 10.1109/TMECH.2012.2220978.

Sfakiotakis, M., Lane, D. M. and Davies, J. B. C. (1999) 'Review of fish swimming modes for aquatic locomotion', *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 24(2), pp. 237–252.
doi: 10.1109/48.757275.

Teledyne Marine (2021). Available at: http://www.teledynemarine.com/slocum-glider?ProductLineID=14&utm_source=unmannedsystemstechnology.com&utm_medium=referral.

Theory of Flight (2021). Available at: <https://web.mit.edu/16.00/www/aec/flight.html>.

Triantafyllou, M. S. and Triantafyllou, G. S. (1995) 'An Efficient Swimming

Machine', *Scientific American*, 272(3), pp. 64–70. doi: 10.1038/scientificamerican0395-64.

Watts, C. M. (2009) 'A Comparison Study of Biologically Inspired Propulsion Systems for An Autonomous Underwater Vehicle', pp. 175–178. Available at: <http://theses.gla.ac.uk/id/eprint/1672>.

What is an Underwater ROV? (2021). Available at: <https://bluerobotics.com/learn/what-is-an-rov/>.

Yin, X. *et al.* (2016) 'Modelling of thrust generated by oscillation caudal fin of underwater bionic robot', *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, 37(5), pp. 601–610. doi: 10.1007/s10483-016-2074-8.

Young, W. C. and Budynas, R. G. (2002) *Roark's formulas for stress and strain*.

Yu, J. *et al.* (2007) 'Mechanical design and motion control of a biomimetic robotic dolphin', *Advanced Robotics*, 21(3–4), pp. 499–513. doi: 10.1163/156855307780131974.

Zhang, Y. *et al.* (2018) 'Design and Control of Bionic Manta Ray Robot With Flexible Pectoral Fin', in *2018 IEEE 14th International Conference on Control and Automation (ICCA)*. IEEE, pp. 1034–1039. doi: 10.1109/ICCA.2018.8444283.

Apêndice A - Resultados da simulação no *SolidWorks* para o veio

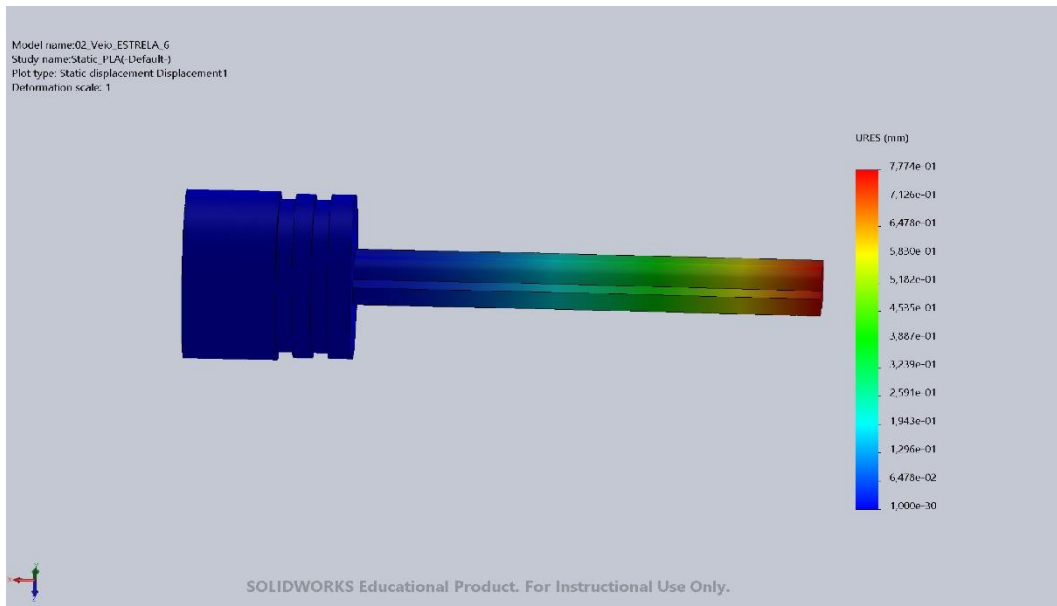


Figura A.1 - Resultados da deformação em mm para o veio em aço AISI 304

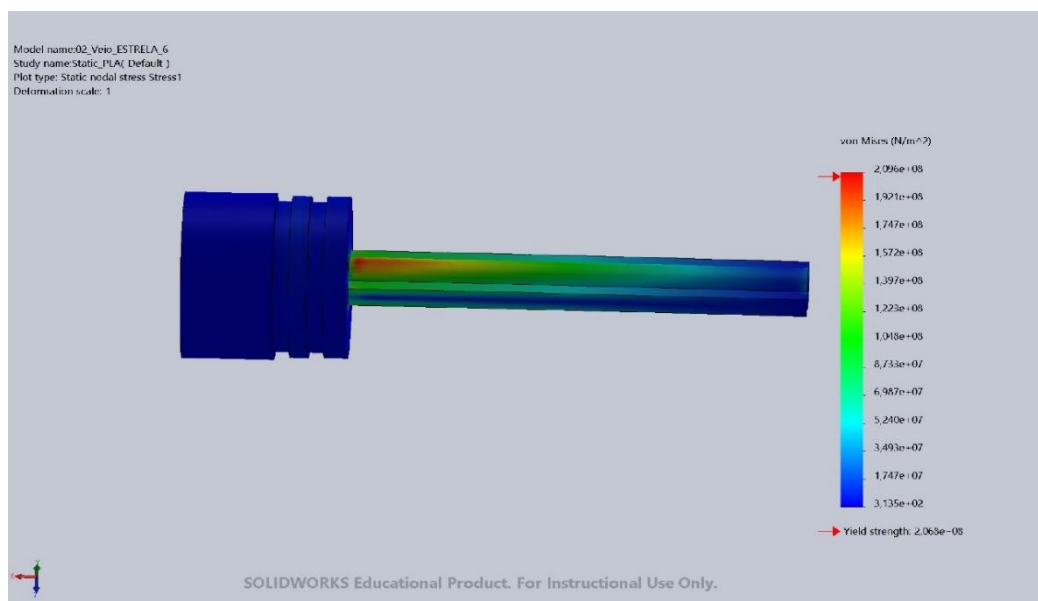


Figura A.2 - Resultados da tensão de VonMises em N/m² para o veio em aço AISI 304.

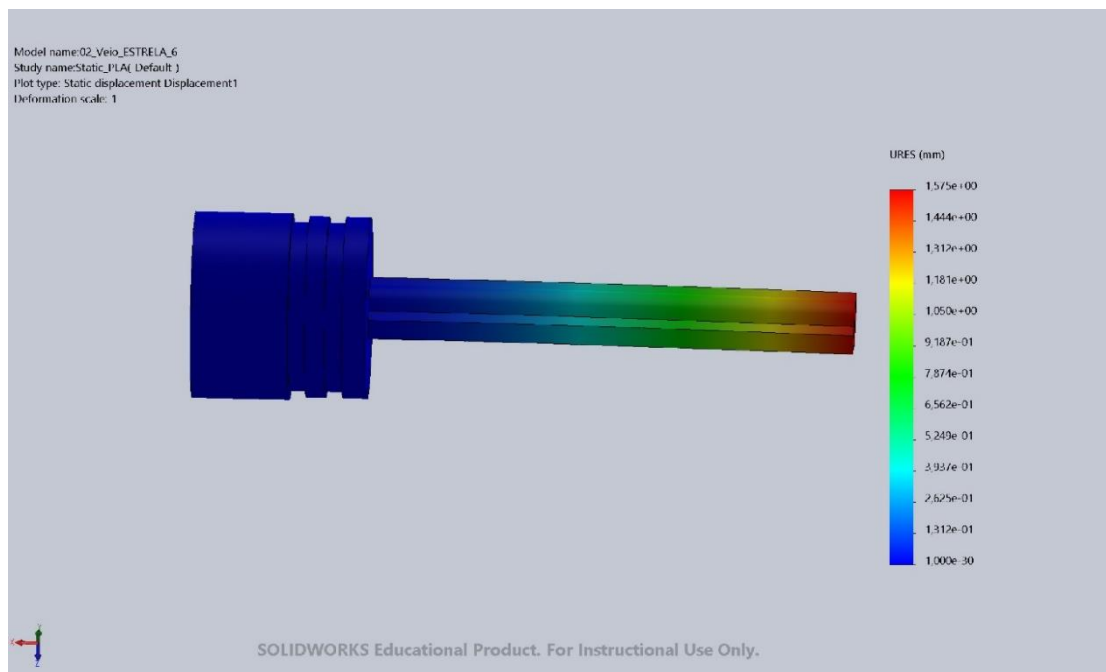


Figura A.3 - Resultados da deformação em mm para o veio em alumínio 5083-H111.

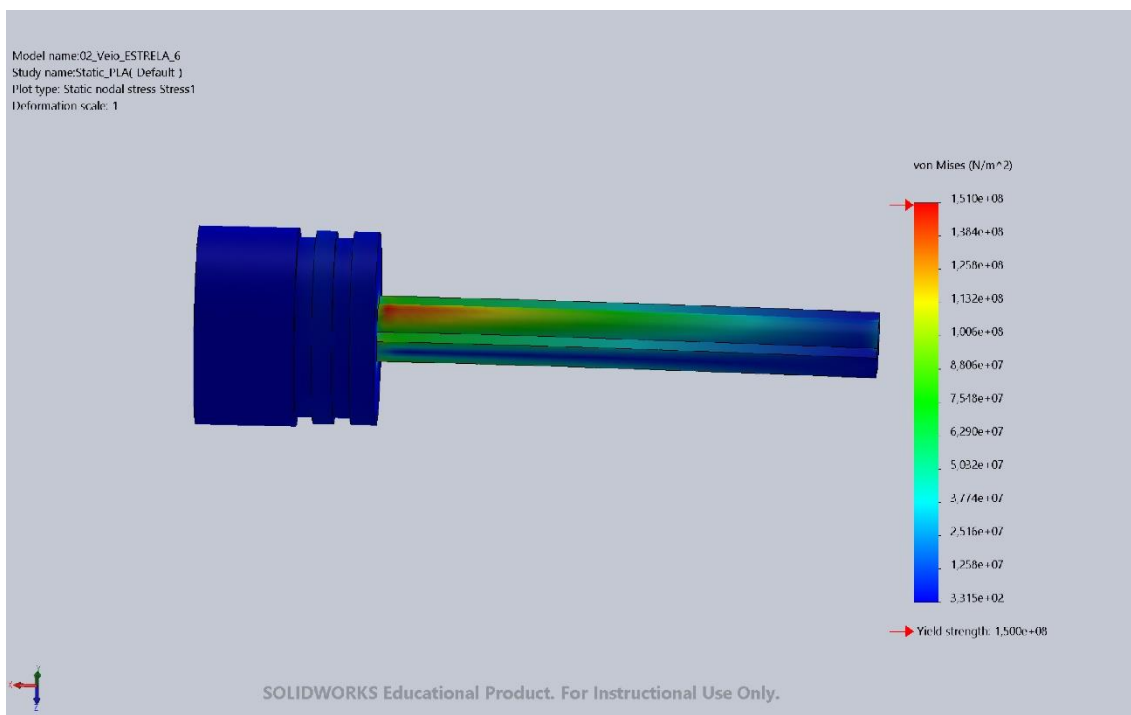


Figura A.4 - Resultados da tensão de VonMises em N/m² para o veio em alumínio 5083-H111.

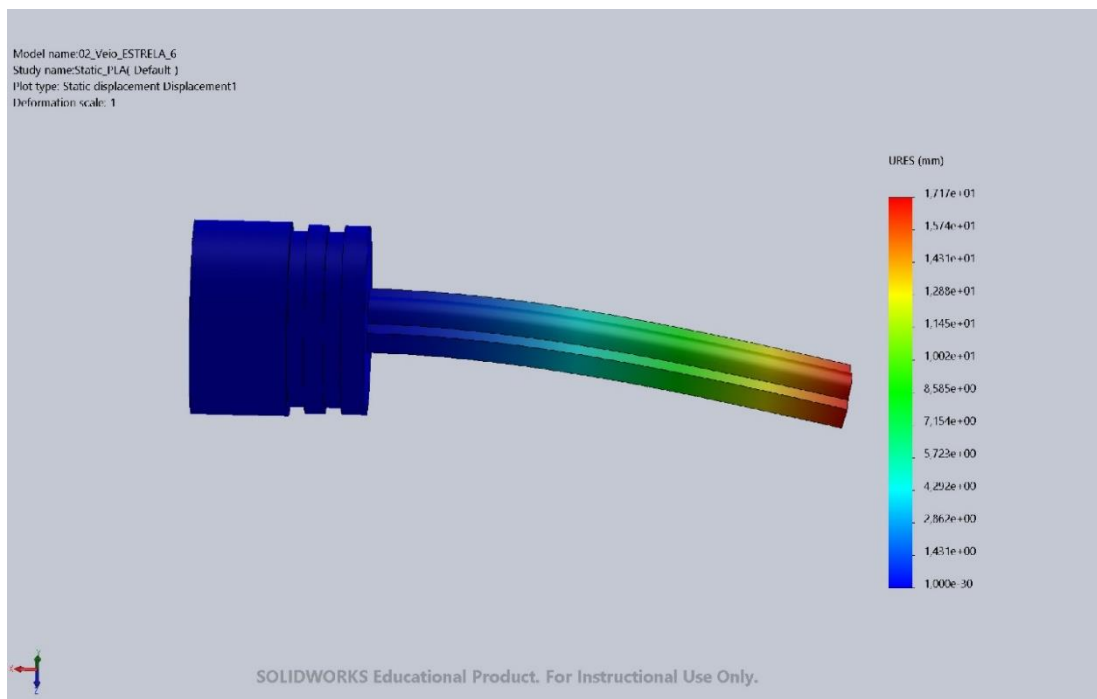


Figura A.5 - Resultados da deformação em mm para o veio em PLA e força aplicada de 93.67N.

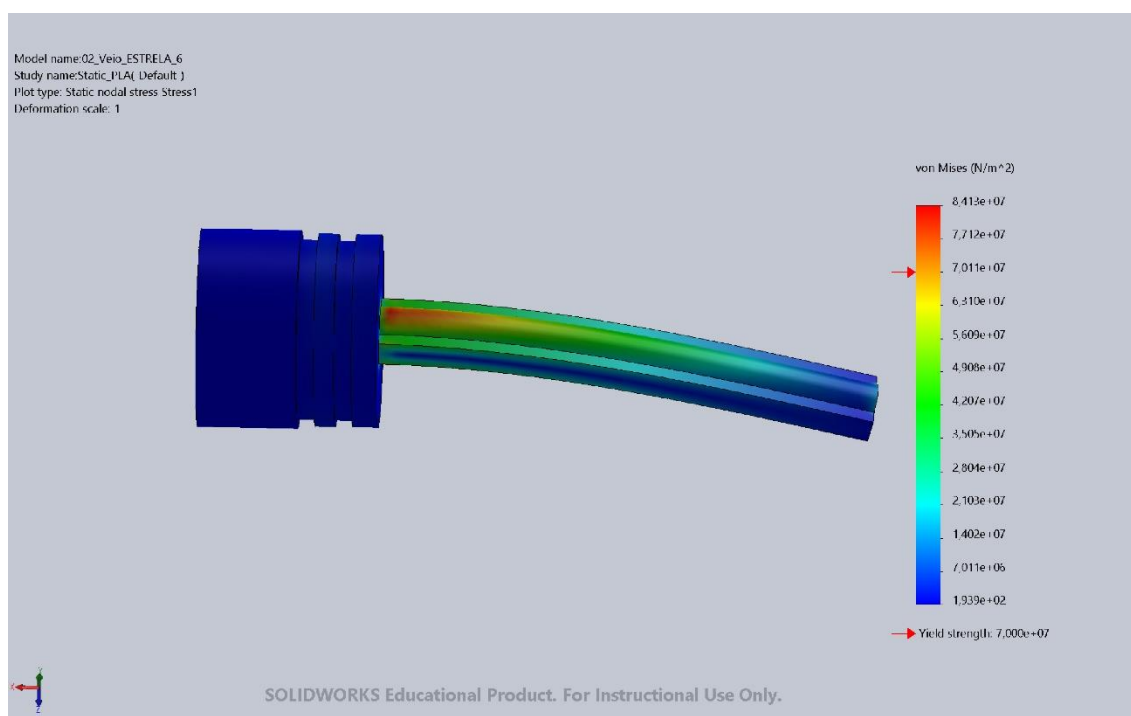


Figura A.6 - Resultados da tensão de VonMises em N/m^2 para o veio em PLA e força aplicada de 93.67N.

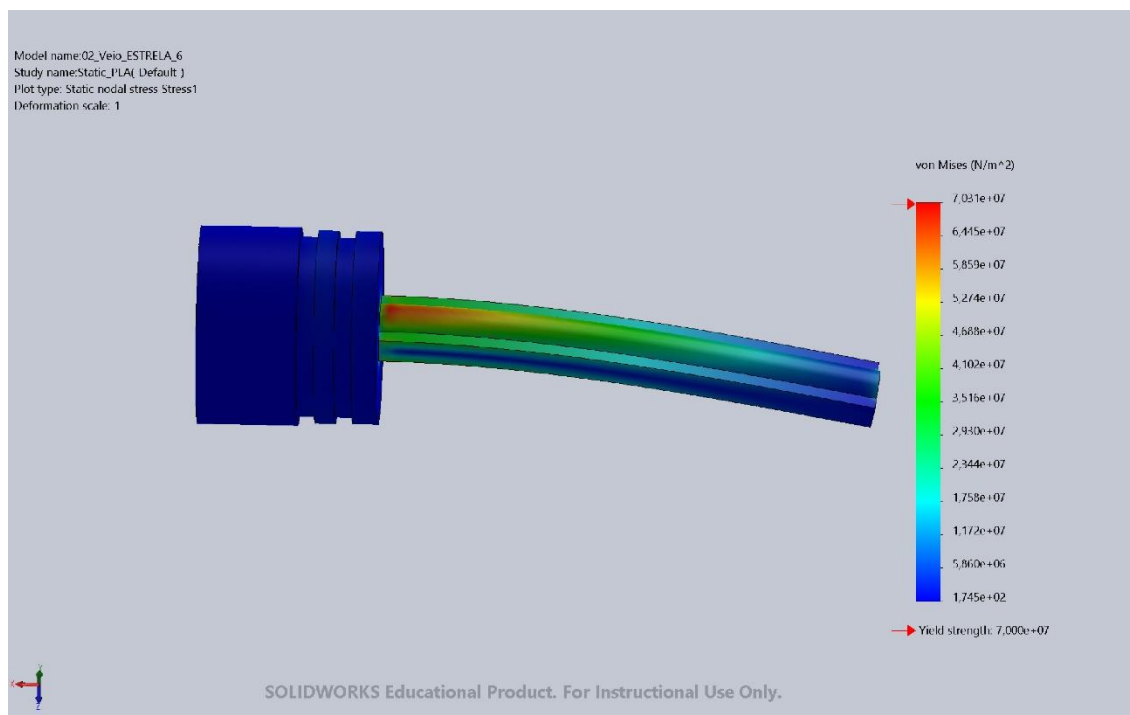


Figura A.7 - Resultados da tensão de VonMises em N/m² para o veio em PLA e força aplicada de 78N.

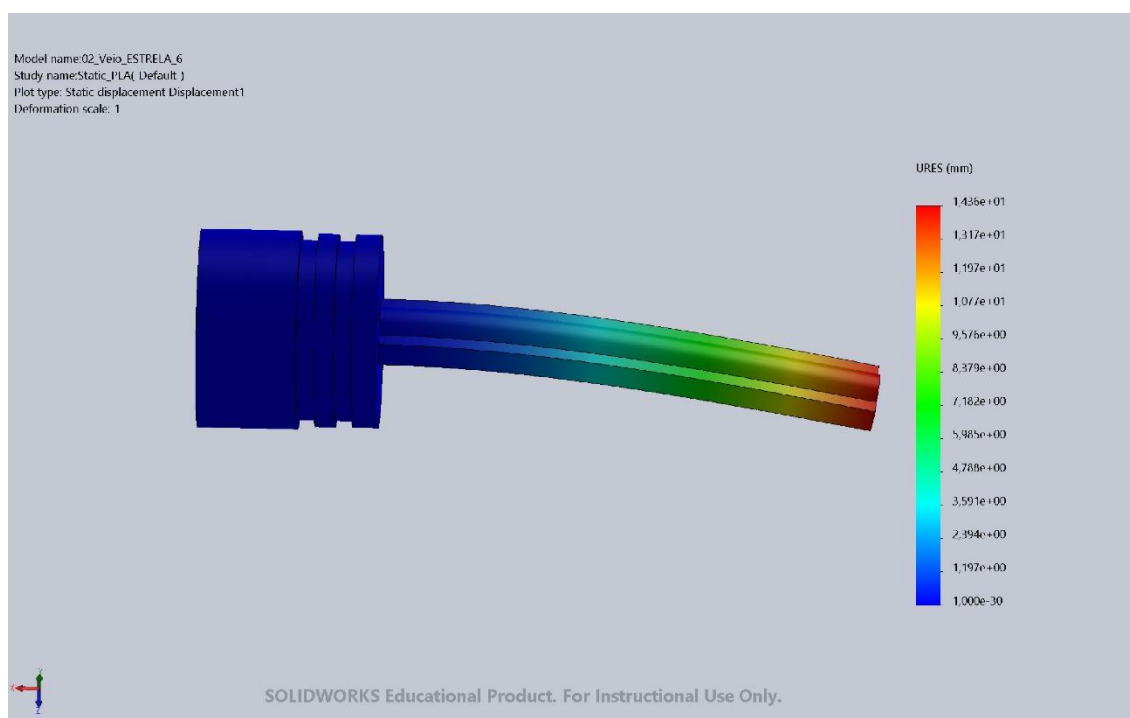


Figura A.8 - Resultados da deformação em mm para o veio em PLA e força aplicada de 78N.

Technical drawing of a bolt with the following dimensions:

- Head diameter: $\varnothing 12,50$
- Head width: 12,00
- Head thickness: $\varnothing 3,50$
- Shank diameter: $\varnothing 34,50$
- Shank length: 100,00
- Hexagonal head dimensions: 5,00 (width), 20,00 (height), 5,00 (width), 1,80 (width), 4,00 (width), 1,80 (width)
- Hexagonal head hole diameter: $\varnothing 37,75$
- Hexagonal head hole width: 8,00
- Hexagonal head hole depth: 1,80

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS				FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN				NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:	
CHKD										Veio	
APPV'D											
MFG											
Q.A.											
										DWG NO.	
										A4	
										SHEET 1 OF 1	

89

Apêndice C - Bucim do veio da Barbatana Peitoral – Desenho Técnico

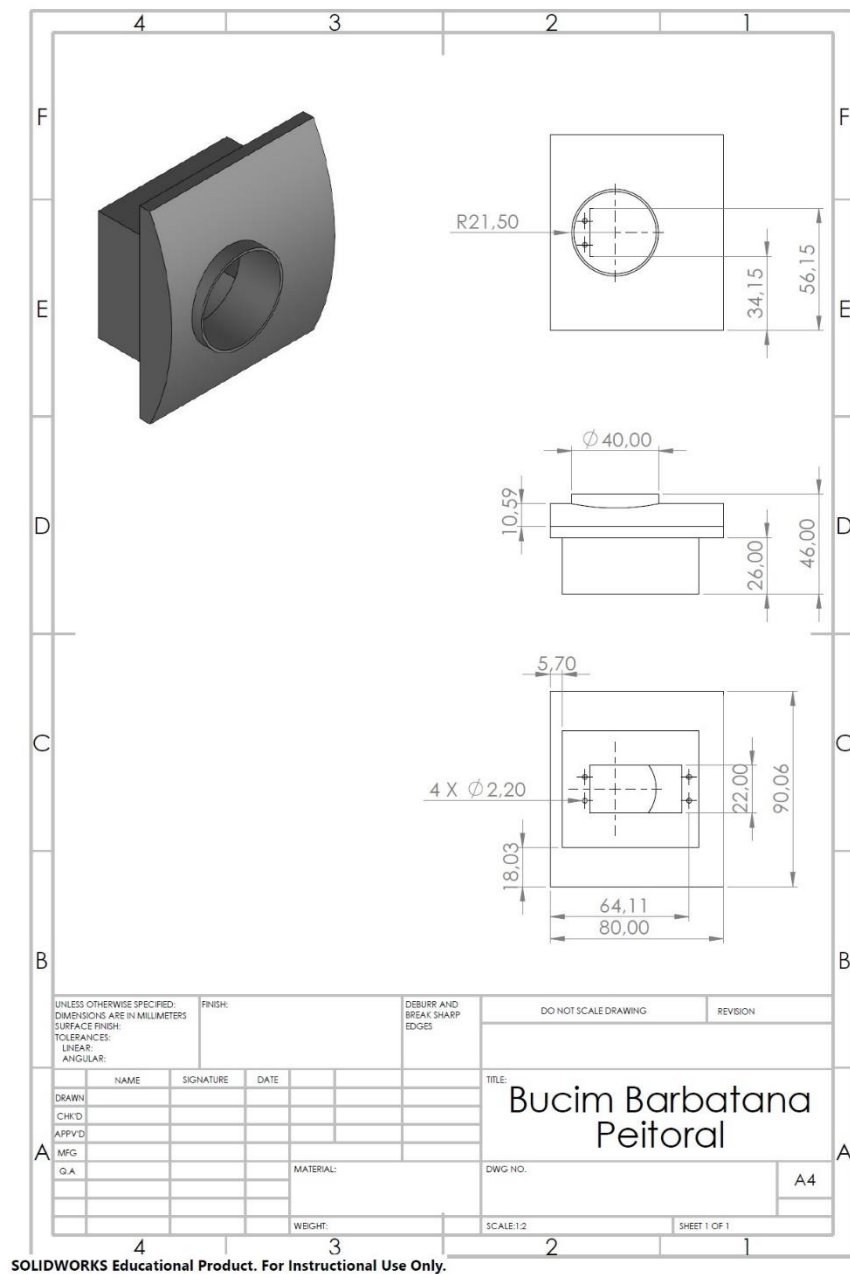


Figura C.1 - Bucim do veio da Barbatana Peitoral

Apêndice D - Barbatana Peitoral – Desenho Técnico

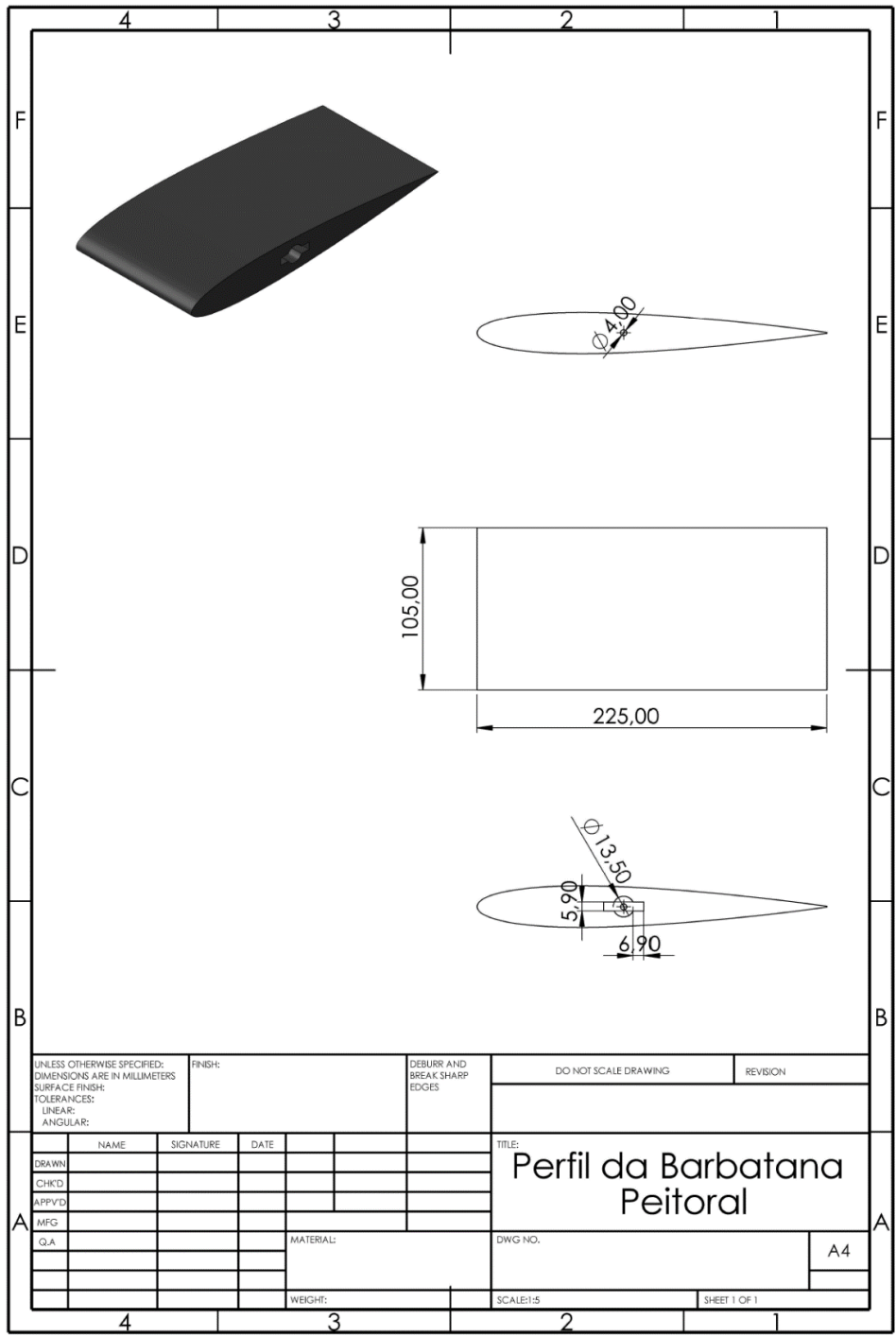


Figura D.1 - Barbatana Peitoral

Apêndice E - Retentor da Barbatana Dorsal – Desenho Técnico

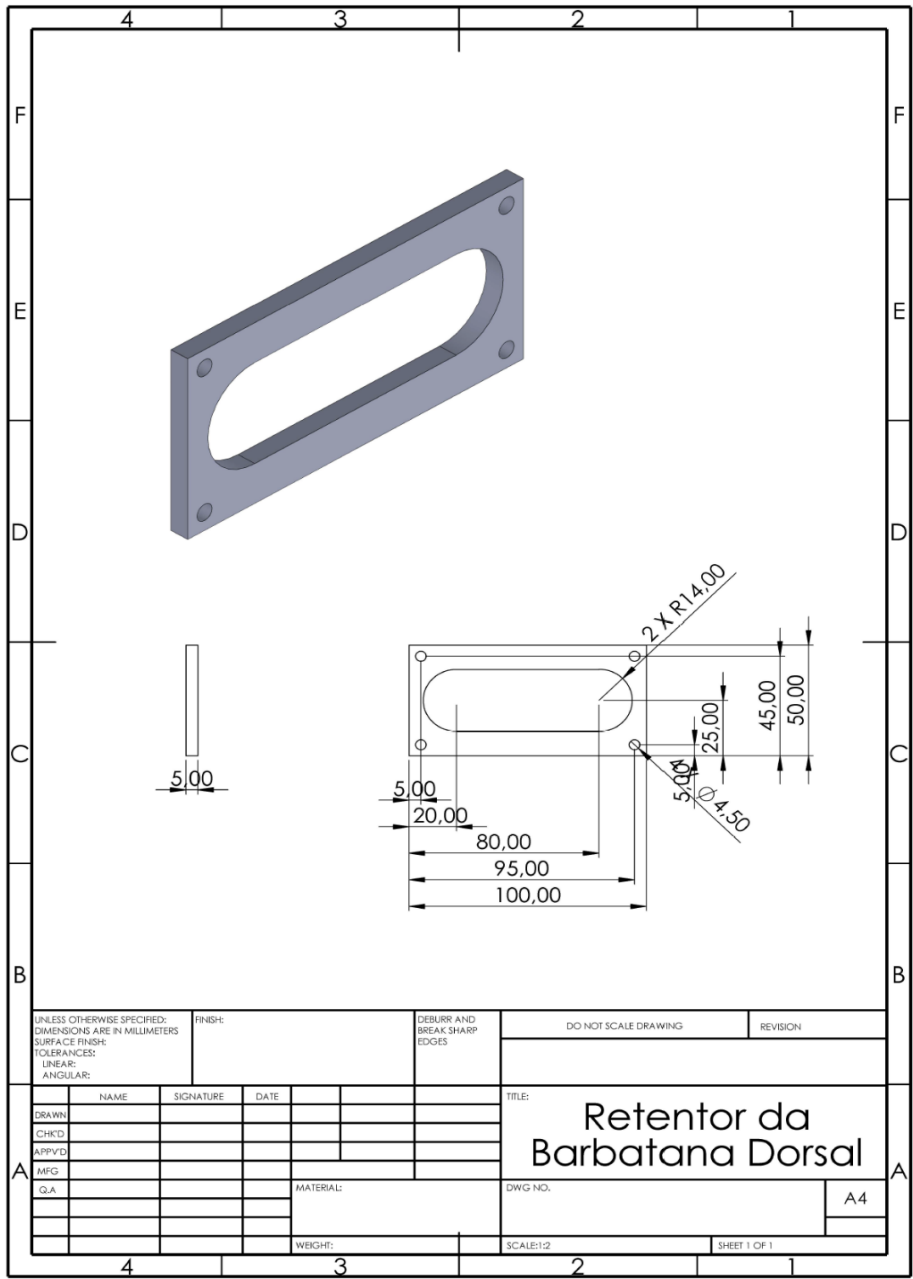


Figura E.1 - Retentor da Barbatana Dorsal

Apêndice F - Costela Anterior – Desenho Técnico

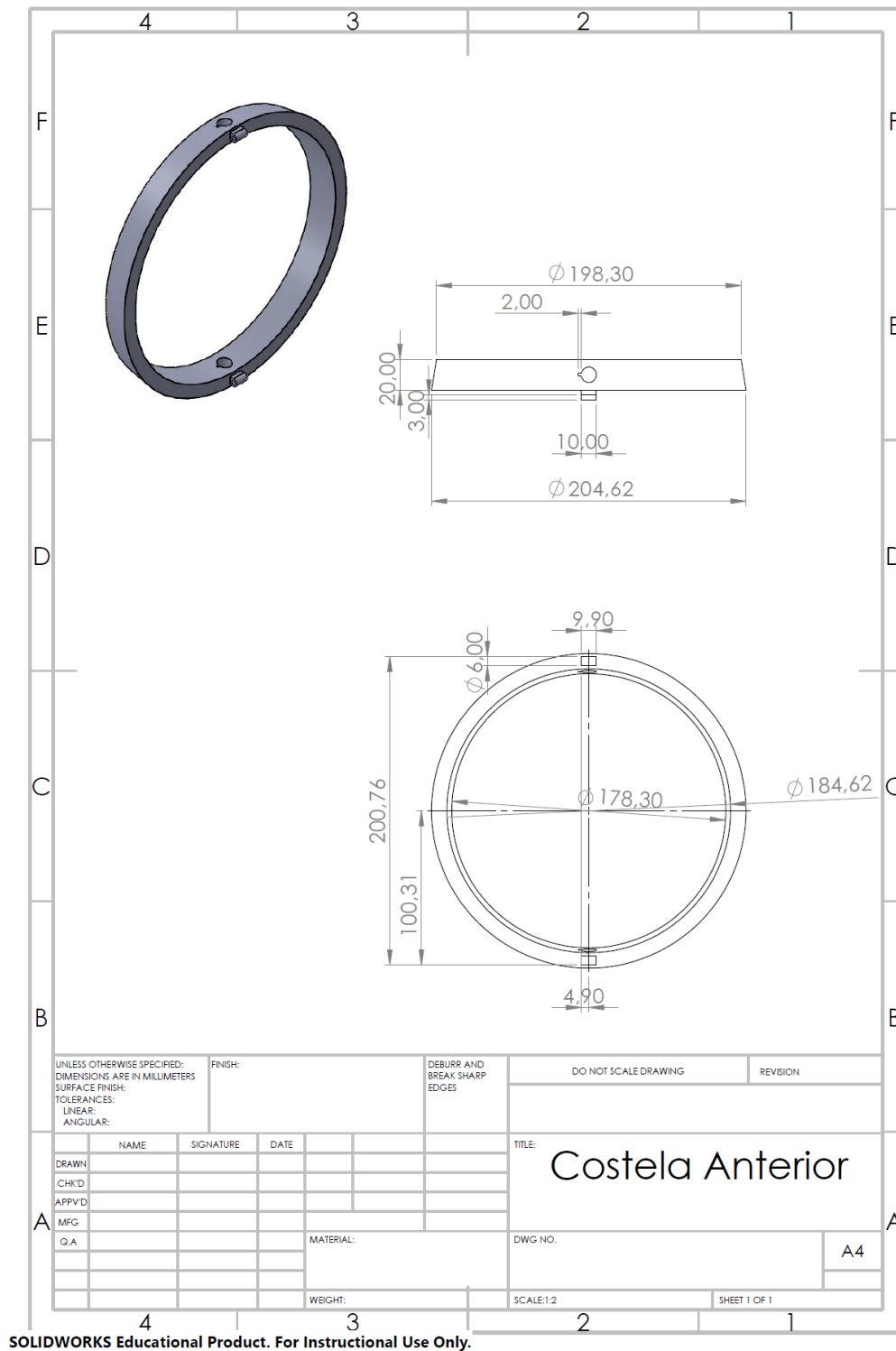


Figura F.1 – Costela Anterior

Apêndice G - Costela Posterior – Desenho Técnico

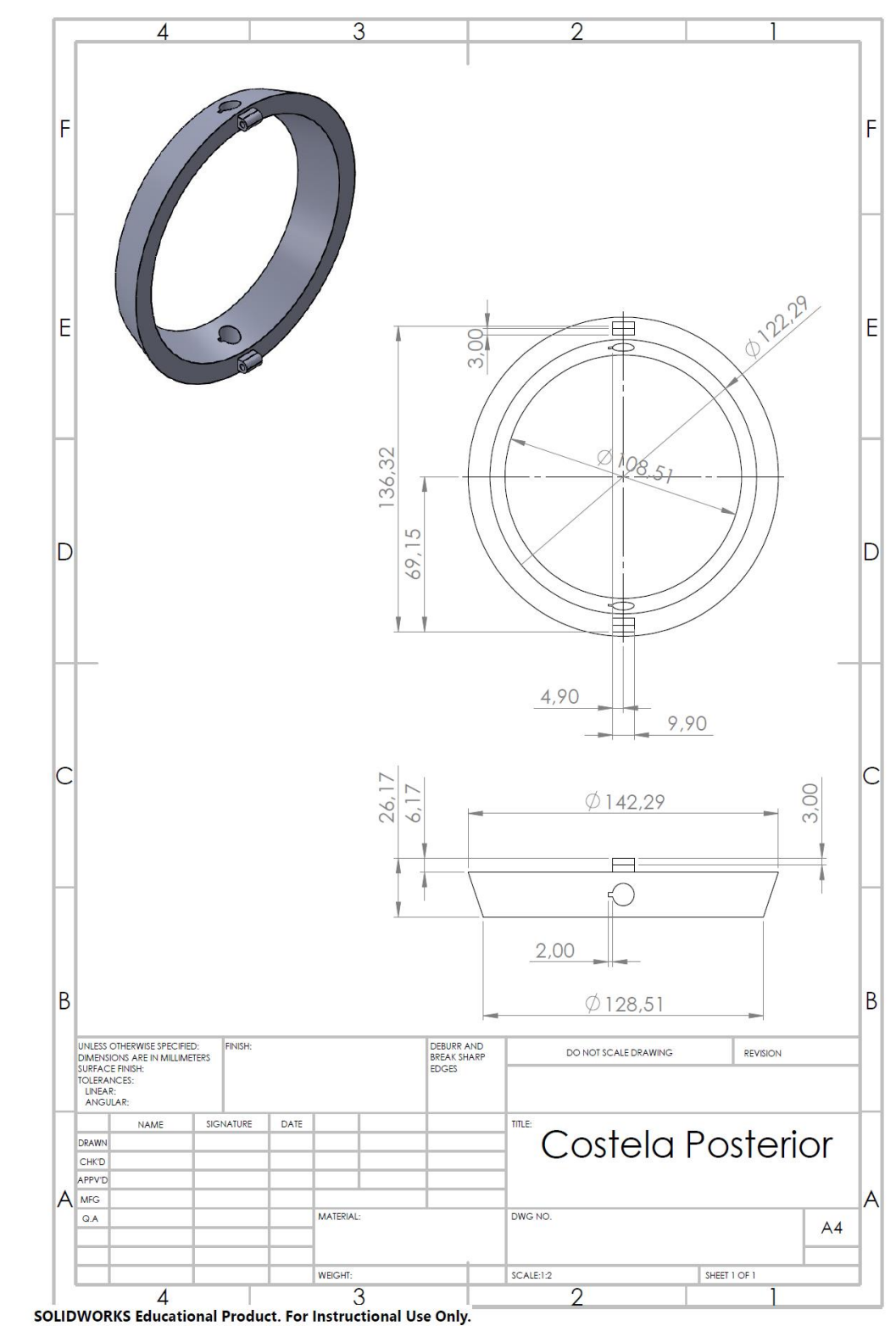


Figura G.1 – Costela Posterior

Apêndice H - Molde Interior – Desenho Técnico

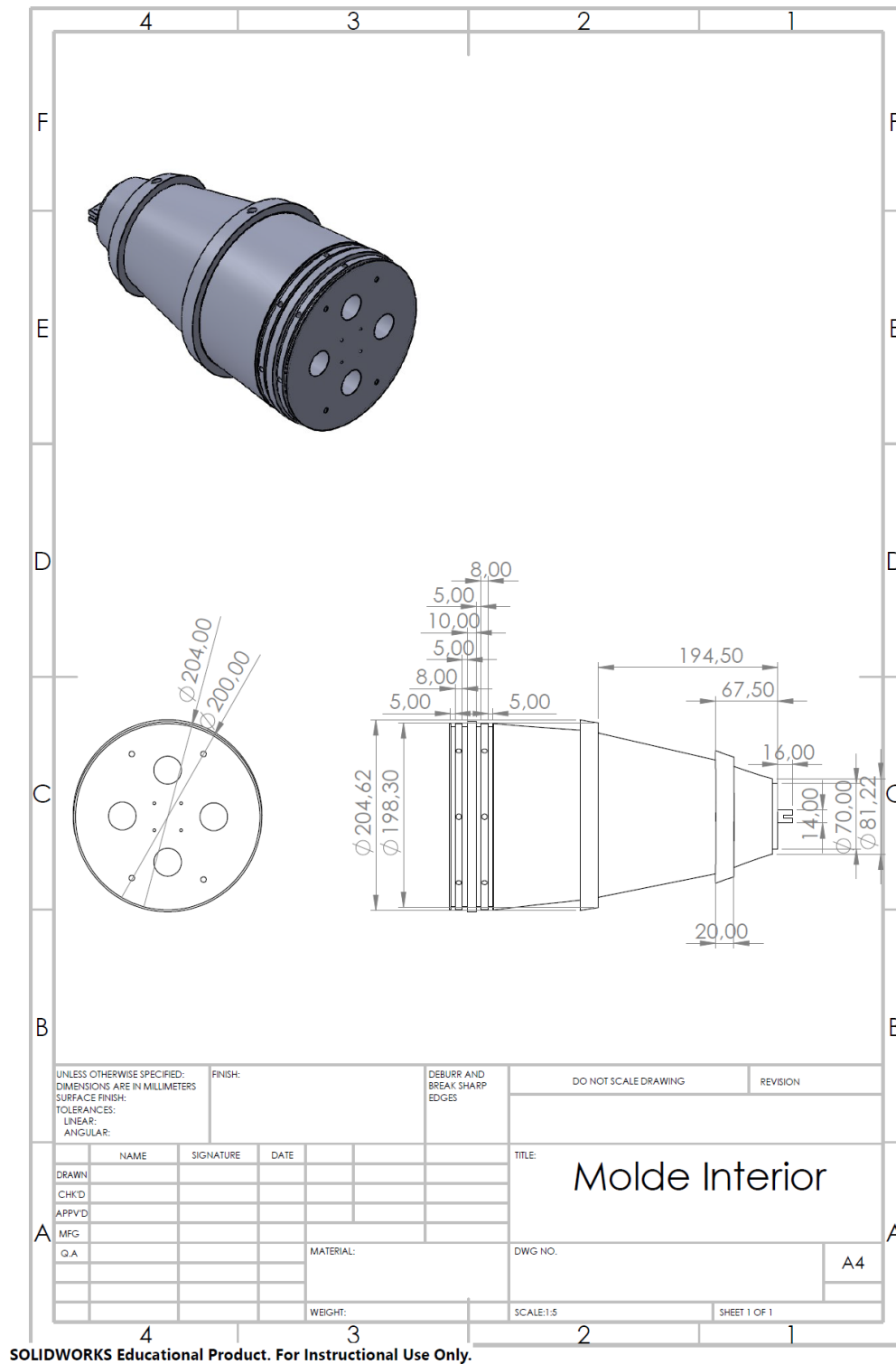
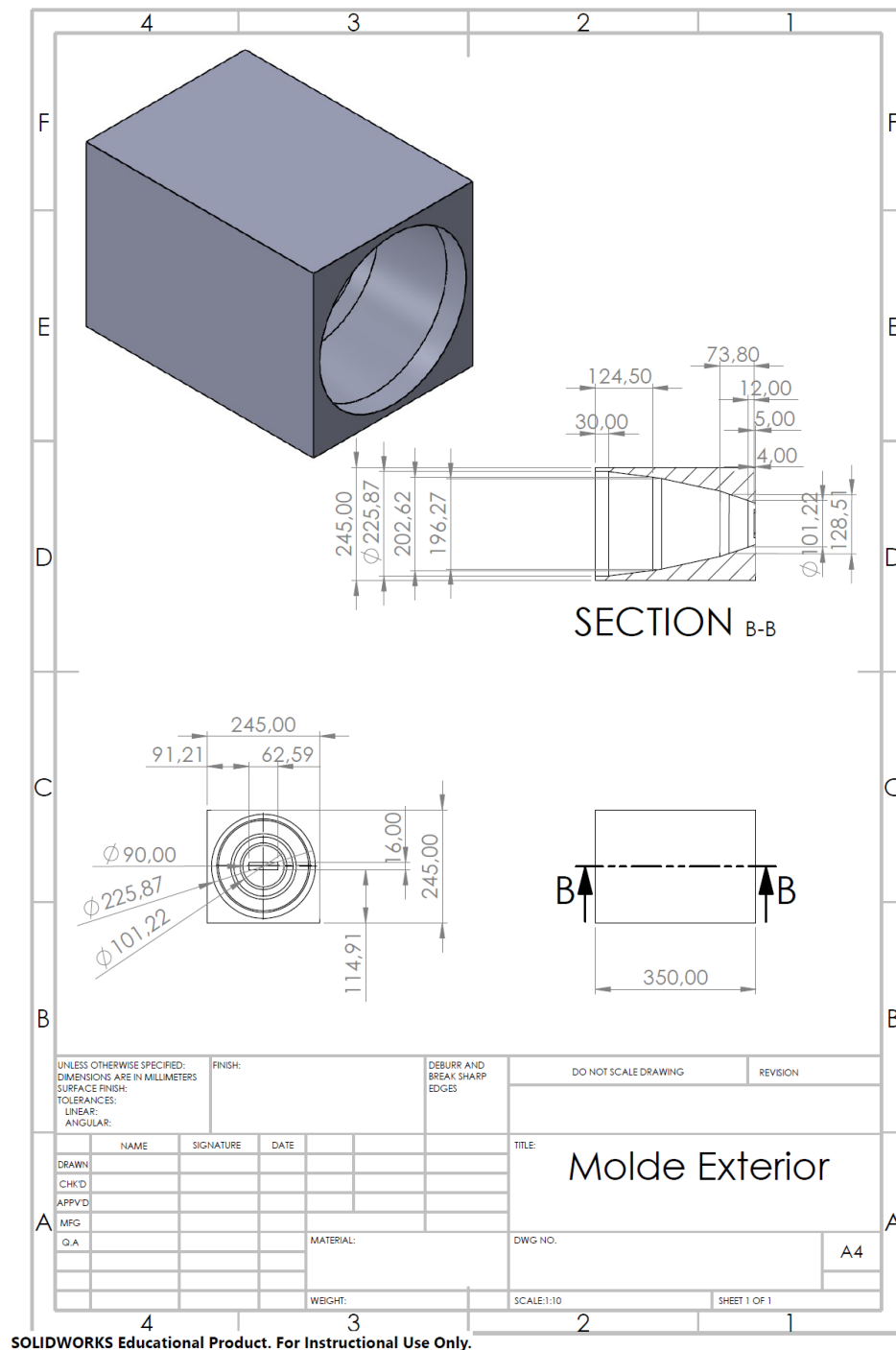


Figura H.1 – Molde Interior para a construção da Barbatana Caudal em silicone.

Apêndice I - Molde Exterior – Desenho Técnico



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

Figura I.1 – Molde Exterior para a construção da Barbatana Caudal em silicone.

Apêndice J - Ligação Conector- Cauda – Desenho Técnico

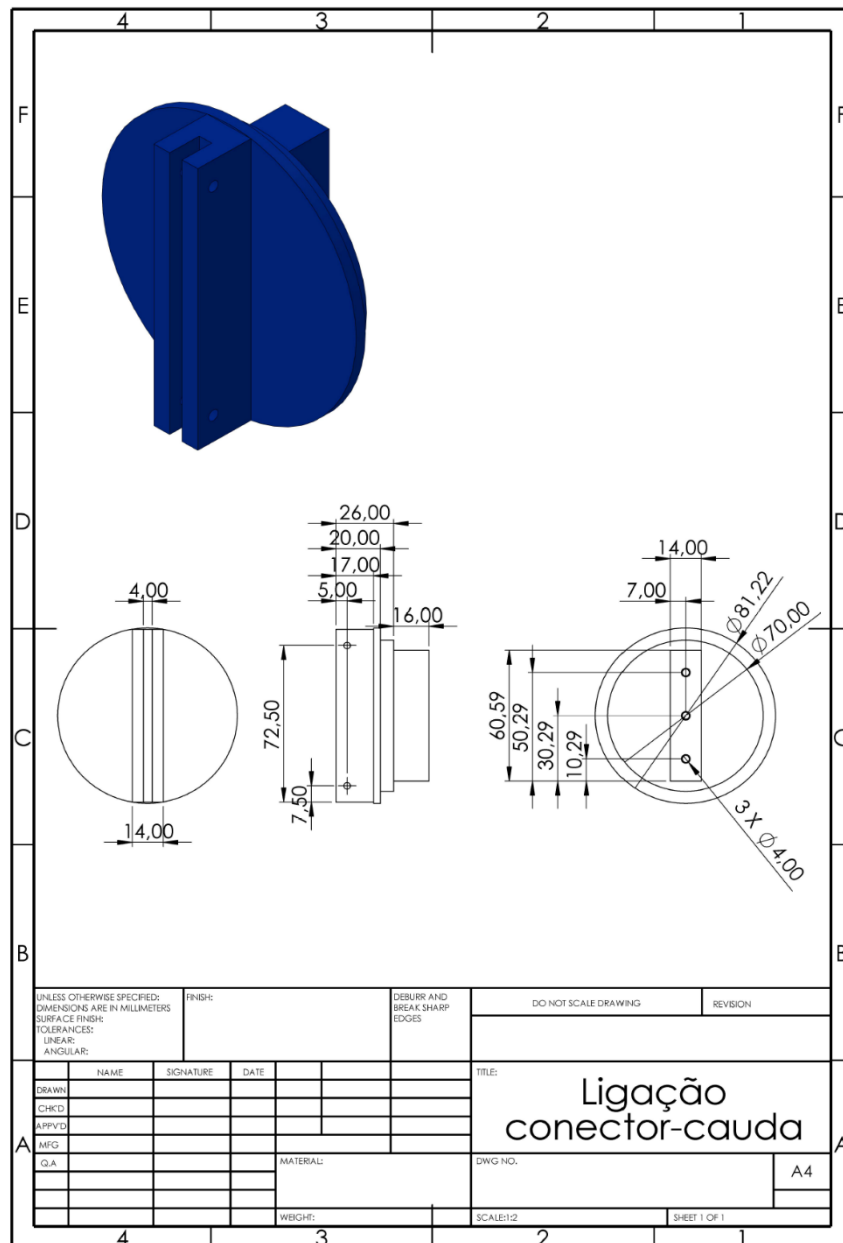


Figura J.1 – Ligação da placa conectora posterior ao conector da barbatana caudal.

Apêndice K - Conector Cauda-Barbatana – Desenho Técnico

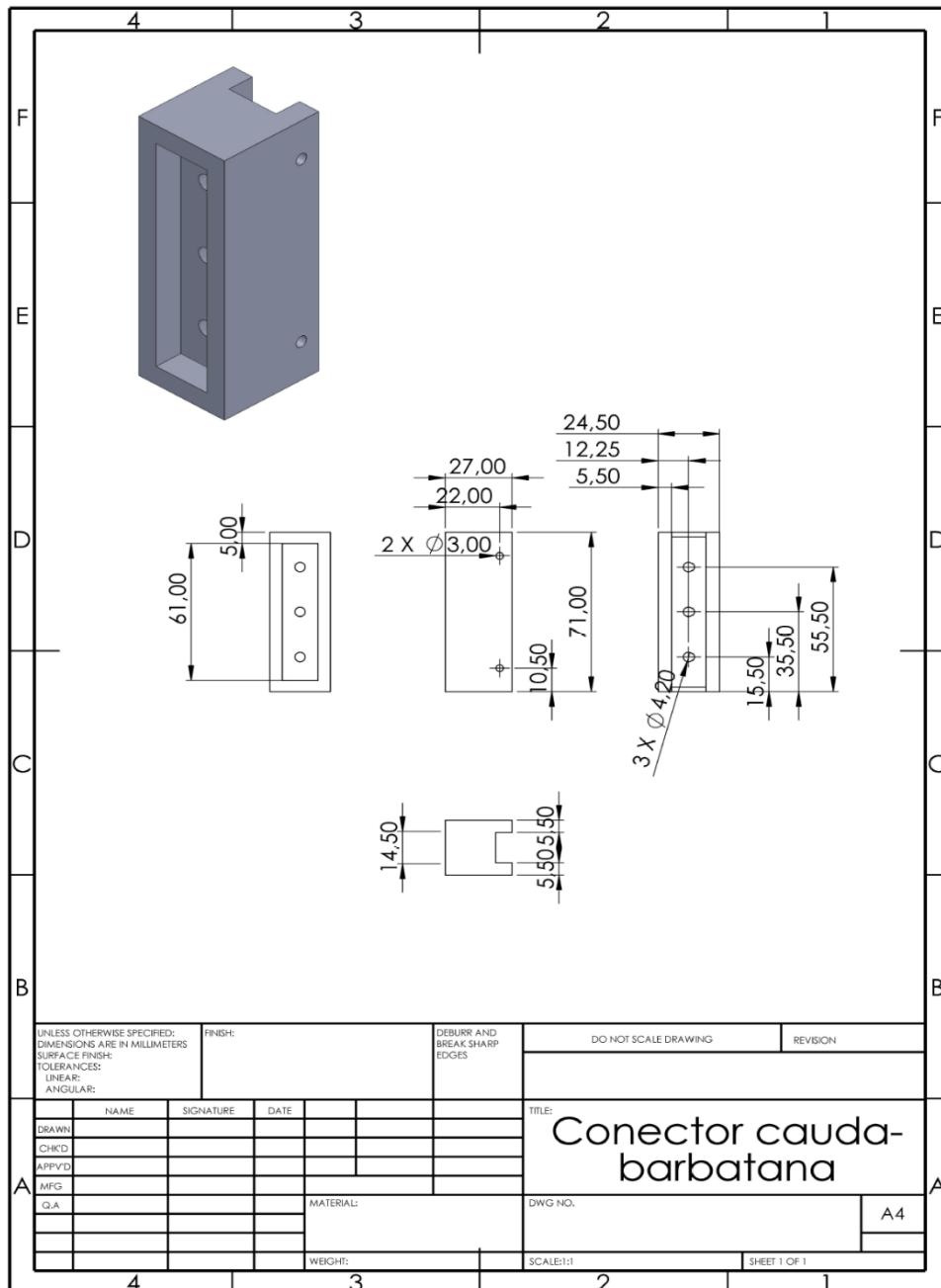


Figura K.1 – Conector entre a cauda e a barbatana caudal.

Apêndice L - Cauda – Desenho Técnico

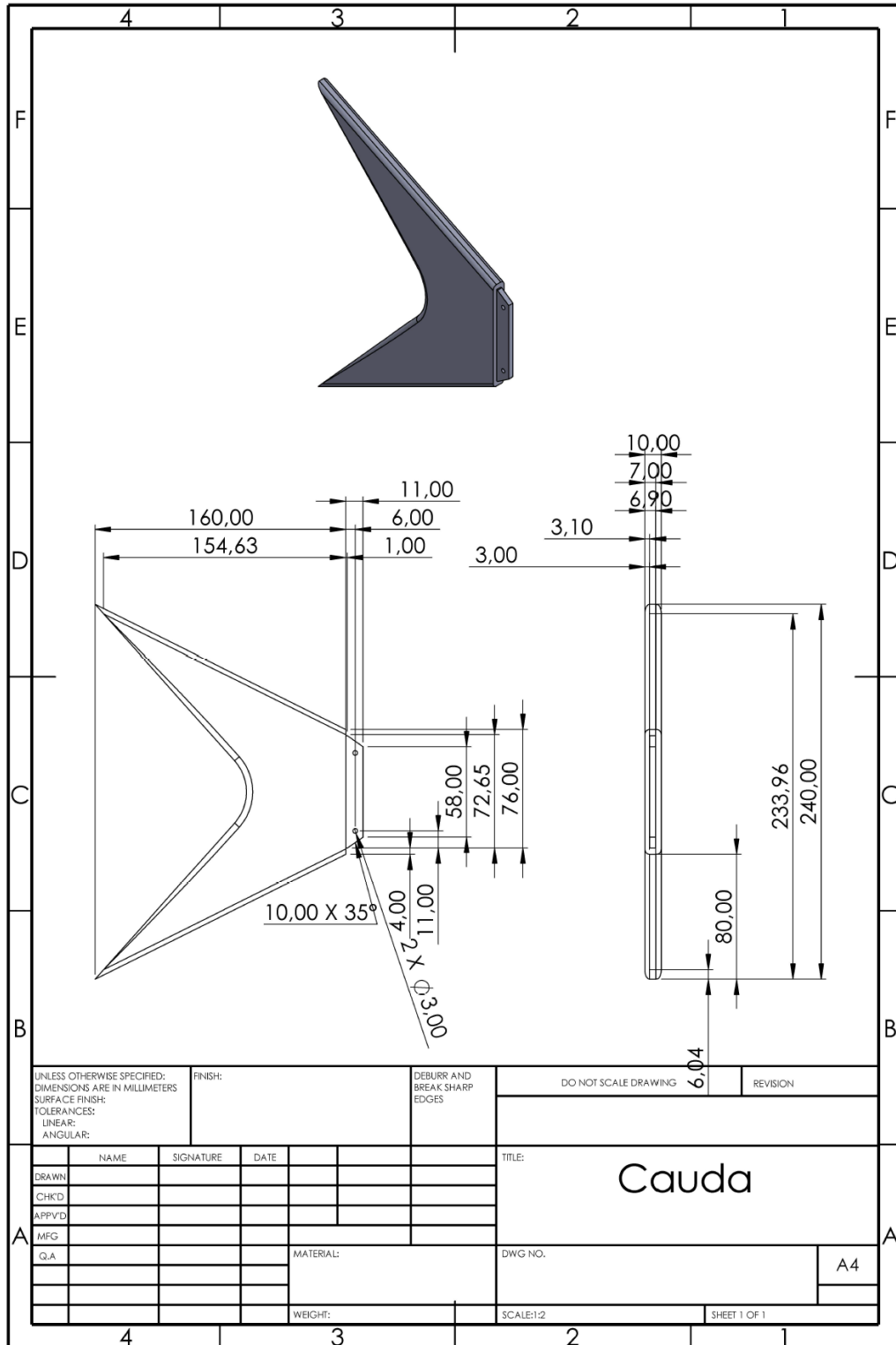


Figura L.1 – Cauda.

Apêndice M – Vista Explodida

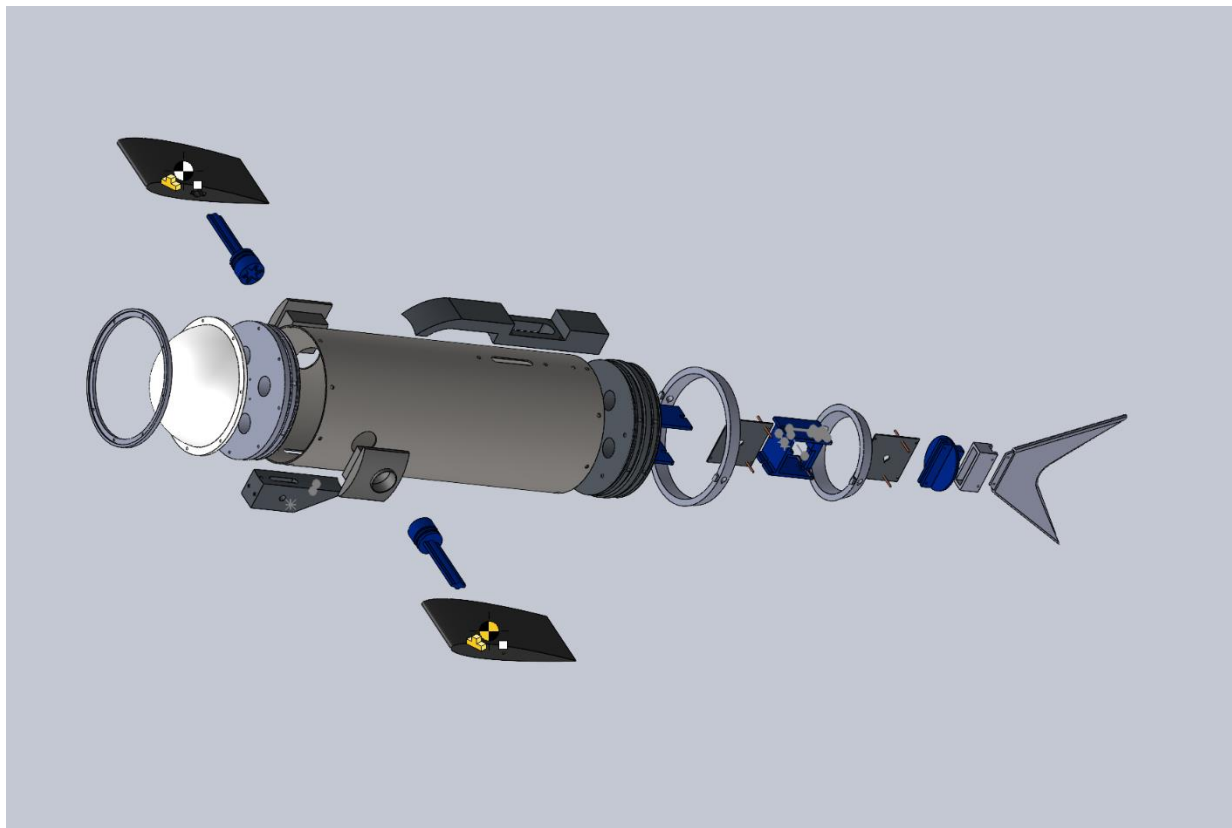


Figura M.1 – Vista explodida dos componentes externos do TOBIAS.

Apêndice N - Código para gerar movimento nos servos

```
#include <Servo.h>

Servo myservo; // create servo object to control a servo
// twelve servo objects can be created on most boards

int pos = 45;    // variable to store the servo position

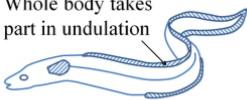
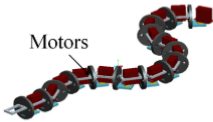
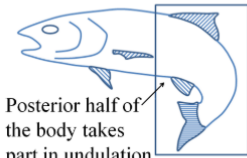
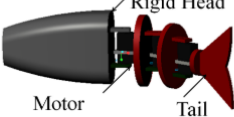
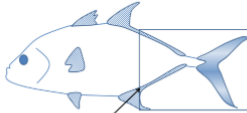
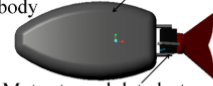

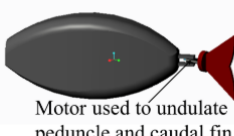

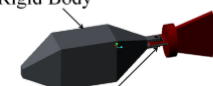
void setup() {
  myservo.attach(8); // attaches the servo on pin 8 to the servo object
}

void loop() {
  for (pos = 45; pos <= 115; pos += 1) { // goes from 0 degrees to 180 degrees
    // in steps of 1 degree
    myservo.write(pos);              // tell servo to go to position in variable 'pos'
    delay(5);                       // waits 15ms for the servo to reach the position
  }
  for (pos = 115; pos >= 45; pos -= 1) { // goes from 180 degrees to 0 degrees
    myservo.write(pos);              // tell servo to go to position in variable 'pos'
    delay(5);                       // waits 15ms for the servo to reach the position
  }
}
```

Figura N.1 – *Servo Sweep*


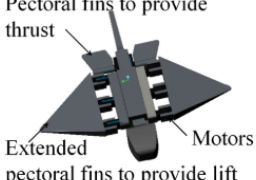
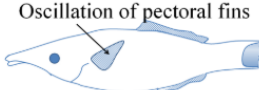

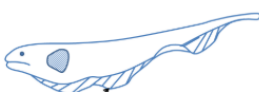

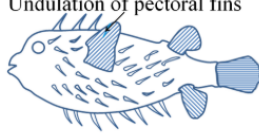
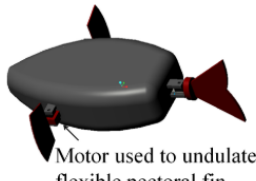
Retirado e adaptado da biblioteca de exemplos do Arduino.

Anexo I - Características e pontos fortes da locomoção BCF

Diagram of Fish	Representative model	CAD	Typical mimicked features	Remarks on performance
<p>Anguilliform</p> <p>Whole body takes part in undulation</p> 	 <p>Motors</p>	<ul style="list-style-type: none">• Hyper-redundancy and full body undulation.• Increase in amplitude of undulation from head to tail.• Motion of robot in direction opposite to the movement of undulatory waves.	<ul style="list-style-type: none">• High Maneuverability.• Low speed and hydrodynamic efficiency.	
<p>Subcarangiform</p> <p>Posterior half of the body takes part in undulation</p> 	 <p>Rigid Head Motor Tail</p>	<ul style="list-style-type: none">• Undulation of posterior half of the robot.• Heavy body with more rounded anterior portion.• Caudal fin with low aspect ratio.	<ul style="list-style-type: none">• Speed higher than Anguilliform locomotion.• Maneuverability lower than Anguilliform locomotion.	
<p>Carangiform</p> <p>Posterior one-third portion of the body takes part in undulation.</p> 	 <p>Rigid two-third part of the body Motor to undulate last one-third portion of body and tail fin</p>	<ul style="list-style-type: none">• Undulation of posterior one third portion of the robot.• Stiff caudal fin.• Moderately narrow necking of peduncle.• Concentration of mass towards the anterior portion of the body.• Angle of inclination of the caudal fin altered while moving from side to side.	<ul style="list-style-type: none">• Speed higher than Anguilliform or Subcarangiform locomotion.• Low maneuverability.	
<p>Thunniform</p> <p>Oscillation of peduncle and caudal fin</p> 	 <p>Motor used to undulate peduncle and caudal fin</p>	<ul style="list-style-type: none">• Undulation of peduncle and caudal fin.• Streamlined body.• Rigid lunate tail fin.	<ul style="list-style-type: none">• Speed higher than Carangiform.• Maneuverability lower than Carangiform locomotion.	
<p>Ostraciiform</p> <p>Only tail oscillates</p> 	 <p>Rigid Body Motor used for oscillation of rigid caudal fin</p>	<ul style="list-style-type: none">• Stiff body with pendulum-like oscillation of caudal fin.• Narrow peduncle.	<ul style="list-style-type: none">• Low hydrodynamic efficiency.• Low speed but high maneuverability.	

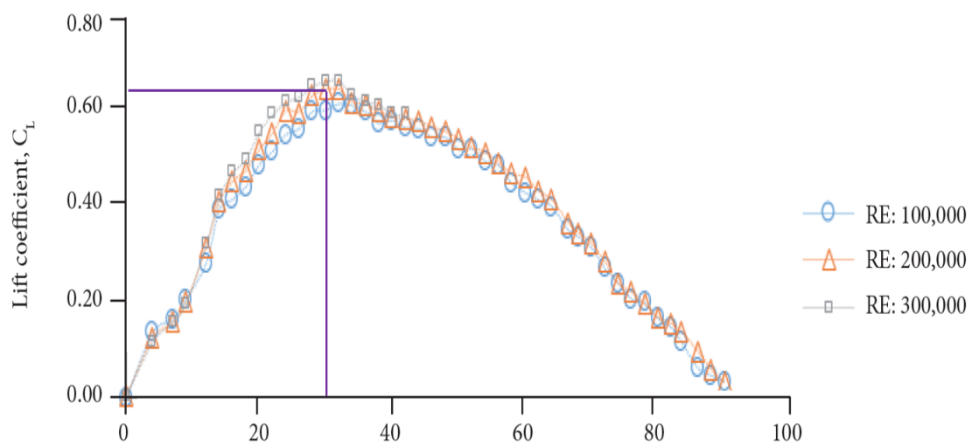
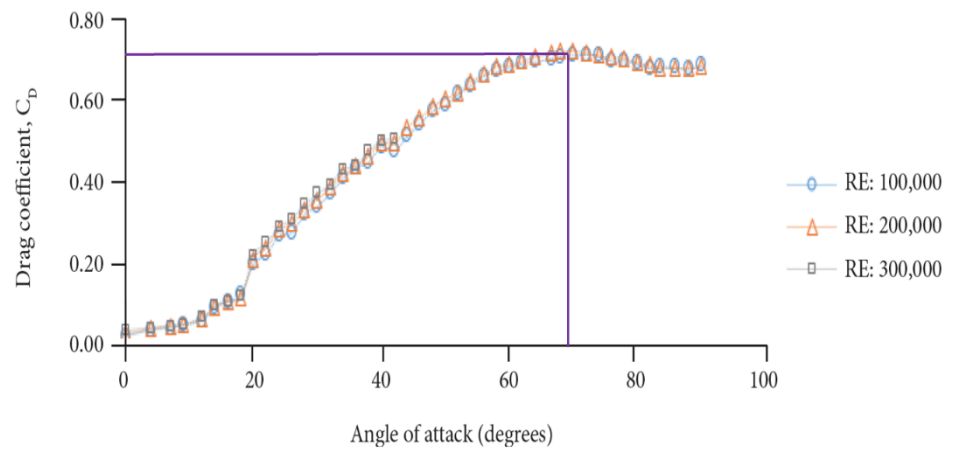
Fonte: (Raj and Thakur, 2016b)

Anexo II - Características e Pontos Fortes da locomoção MPF

Diagram of Fish	Representative model	CAD	Typical mimicked features	Remarks on performance
<p>Rajiform</p>  <p>Undulation and oscillation of extended pectoral fins</p>	 <p>Pectoral fins to provide thrust Extended pectoral fins to provide lift</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Large flexible triangular shaped pectoral fins. • Increase in undulation amplitude from anterior portion to fin apex. • Decrease in undulation amplitude from fin apex to the posterior portion. • Up and down flapping of fins. • Sharp angle of attack in pectoral fins. 	<ul style="list-style-type: none"> • Low speed. • Low to medium level of maneuverability.
<p>Labriform</p>  <p>Oscillation of pectoral fins</p>	 <p>Oscillation of pectoral fins connected to the body by means of motor</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Oscillating narrow-based pectoral fins. • Fan-like and rounded pectoral fins. • Fins brought far forward and then forced back broadside in rowing mode. • Up and down flapping fins in flapping mode. 	<ul style="list-style-type: none"> • Low speed and maneuverability.
<p>Gymnotiform</p>  <p>Undulation of extended anal fin</p>	 <p>Each of the fin element is rotated by means of motor</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Hyper-redundancy of undulating anal fin. • Rigidity of the body. 	<ul style="list-style-type: none"> • High maneuverability. • Speed higher than Labriform locomotion.
<p>Diodontiform</p>  <p>Undulation of pectoral fins</p>	 <p>Motor used to undulate flexible pectoral fin</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Broad undulating pectoral fin. • Placement of fin base in variable planes. • Changeable pectoral fin angle. 	<ul style="list-style-type: none"> • Speed higher than Labriform locomotion. • High but slow maneuverability.

Fonte: (Raj and Thakur, 2016b)

Anexo III - Gráficos dos coeficientes de arrasto e sustentação em relação ao ângulo de ataque



Fonte : Retirado de (Eftekhari and Mahdi Al-Obaidi, 2019)